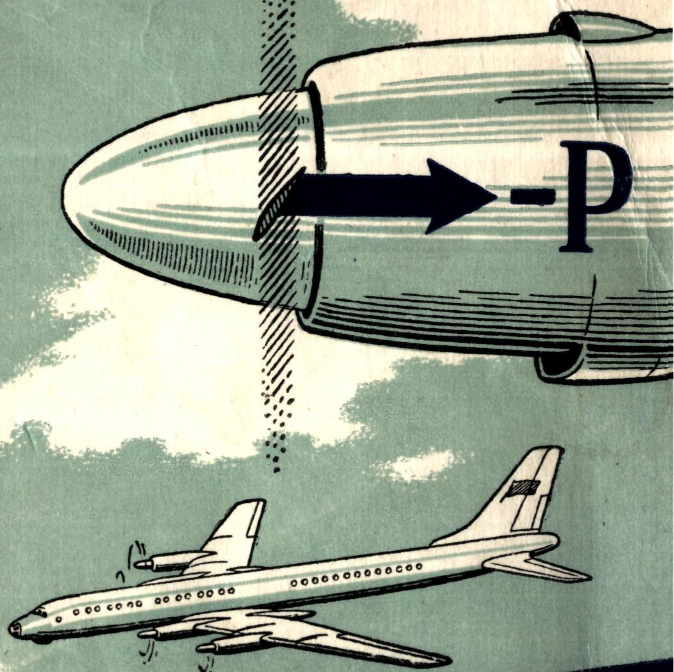
VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM



За военно-технические знания



В. В. ФИЛИППОВ

КАК ЛЕТЧИКУ БОРОТЬСЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГОЙ ТВД

В. В. ФИЛИППОВ

КАК ЛЕТЧИКУ БОРОТЬСЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГОЙ ТВД

(Об особенностях работы и эксплуатации на самолете турбовинтового двигателя)

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1961

358. 4
Ф 53

Инженер-полковник **В. В. Филиппов**

КАК ЛЕТЧИКУ БОРОТЬСЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЯГОЙ ТВД

В брошюре в популярной форме рассматриваются некоторые вопросы работы и эксплуатации на самолете турбовинтового двигателя (ТВД).

Особое внимание уделяется основной особенности работы ТВД — образованию отрицательной тяги в определенные моменты эксплуатации. Дается ряд практических рекомендаций летному составу.

Труд написан по материалам, опубликованным в открытой отечественной и иностранной печати.

Брошюра предназначается для летного и технического состава ВВС и ГВФ, а также для лиц, интересующихся работой ТВД на самолетах.

Рецензент инженер-полковник **П. С. Шевелько.**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на самолеты военной и гражданской авиации устанавливаются только реактивные газотурбинные двигатели, пришедшие на смену двигателям поршневым.

Преимущество реактивных двигателей перед поршневыми определяется их способностью развивать колоссальную мощность при небольшом весе.

На военных самолетах наибольшее распространение получили турбореактивные двигатели (ТРД); на транспортных и пассажирских самолетах устанавливаются наряду с турбореактивными и турбовинтовые двигатели (ТВД). Например, на всемирно известных воздушных лайнерах Ту-104 установлены турбореактивные двигатели, а на Ил-18 и Ан-10 — турбовинтовые. Но сейчас еще трудно сказать, какой из газотурбинных двигателей найдет бо́льшее применение на транспортных и пассажирских самолетах.

Турбореактивные двигатели по сравнению с турбовинтовыми обладают ме́ньшим весом, более просты по конструкции и удобнее в эксплуатации и обслуживании, но имеют сравнительно высокий удельный расход топлива и недостаточную (по сравнению с ТВД) тягу при взлете самолета.

Турбовинтовые двигатели, несмотря на некоторую громоздкость конструкции (винт, редуктор), значительно экономичнее ТРД (имеют меньший удельный расход топлива). Они превосходят ТРД также по абсолютной величине развиваемой тяги при взлете, что улучшает взлетные характеристики. Кроме того, в момент разбега взлетные характеристики самолета с ТВД улучшаются за счет резкого увеличения подъемной силы крыла в результате его обдува воздушным потоком от вращающихся винтов ТВД.

Но самолеты с турбовинтовыми двигателями уступают самолетам с турбореактивными двигателями в достижении больших скоростей полета на высотах.

Как известно, сила тяги турбовинтовой силовой установки создается за счет воздушного винта и реакции

текающих из реактивного сопла газов. Причем основную величину силы тяги создает воздушный винт (85—90%). Реактивная тяга составляет не более 10—15%.

Таким образом, основным движителем самолета с ТВД, как и для самолета с поршневым двигателем, является воздушный винт.

Следовательно, силовой установке с ТВД присущ тот же основной недостаток, что и силовой установке с поршневым двигателем, а именно: падение к. п. д. винта на больших скоростях полета из-за возрастания волнового сопротивления на концах вращающихся лопастей. Интенсивное падение к. п. д. становится ощутимым уже при скорости полета 800—900 *км/час*.

Этим, собственно, и объясняется широкое применение ТВД на транспортных самолетах, для которых величина максимальной скорости имеет меньшее значение, чем дальность полета и грузоподъемность.

Удельный расход топлива у ТВД на высотах 8000—10 000 *м* практически равен расходу топлива на поршневых двигателях, а удельный вес ТВД, измеряемый в килограммах на лошадиную силу, почти в два раза меньше. Это позволяет получить очень мощную, легкую и вместе с тем экономичную силовую установку для самолета и обеспечить ему высокие летные данные.

Применение силовых установок с ТВД внесло ряд принципиальных изменений не только в конструкцию, но и в практику эксплуатации самолетов и потребовало от летного и технического состава глубоких знаний особенностей работы ТВД, воздушных винтов и регулирующих агрегатов этих силовых установок. В настоящей работе и делается попытка разъяснить читателю основные особенности работы турбовинтовых силовых установок на самолете в полете и на земле и некоторые принципиальные вопросы их эксплуатации.

---

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ АГРЕГАТОВ

Одновальные и двухвальные ТВД

В настоящее время в эксплуатации находят применение два различных типа ТВД — одновальные и двухвальные.

Несмотря на то что и те и другие двигатели турбовинтовые, условия регулирования, работы воздушного винта и силовой установки в целом у этих двигателей различны.

У двухвальных двигателей (рис. 1) один вал вращает компрессор от одной турбины, а второй вал вращает винт от другой, независимой (свободной) турбины. Расход воздуха двухвального ТВД мало зависит от оборотов винта, так как число оборотов компрессора постоянно и не связано с турбиной, вращающей винт. Такой двигатель работает устойчиво в широком диапазоне оборотов воздушного винта. Однако применение раздельных турбин, работающих от общих камер сгорания, усложняет не только конструкцию самого двигателя, но и систему регулирования и управления.

Поэтому бо́льшее распространение в силовых установках самолетов в настоящее время получают одновальные ТВД, у которых винт и компрессор приводятся во вращение от одного вала, имеющего одну или несколько турбин (рис. 2).

У одновальных ТВД компрессор и винт непосредственно связаны между собой и изменение оборотов винта прямо влияет на работу компрессора. При резком изменении числа оборотов винта работа компрессора может легко стать неустойчивой. Чтобы этого не случилось, применяют такую систему регулирования одновальных ТВД, которая обеспечивает постоянное значение числа оборотов во всем диапазоне режимов работы двигателя, кроме режима работы на земле на малом газе (до начала так называемой загрузки винта).

Номинальное постоянное число оборотов ТВД состав-

вытекающих из реактивного сопла газов. Причем основную величину силы тяги создает воздушный винт (85—90%). Реактивная тяга составляет не более 10—15%.

Таким образом, основным движителем самолета с ТВД, как и для самолета с поршневым двигателем, является воздушный винт.

Следовательно, силовой установке с ТВД присущ тот же основной недостаток, что и силовой установке с поршневым двигателем, а именно: падение к. п. д. винта на больших скоростях полета из-за возрастания волнового сопротивления на концах вращающихся лопастей. Интенсивное падение к. п. д. становится ощутимым уже при скорости полета 800—900 *км/час*.

Этим, собственно, и объясняется широкое применение ТВД на транспортных самолетах, для которых величина максимальной скорости имеет меньшее значение, чем дальность полета и грузоподъемность.

Удельный расход топлива у ТВД на высотах 8000—10 000 *м* практически равен расходу топлива на поршневых двигателях, а удельный вес ТВД, измеряемый в килограммах на лошадиную силу, почти в два раза меньше. Это позволяет получить очень мощную, легкую и вместе с тем экономичную силовую установку для самолета и обеспечить ему высокие летные данные.

Применение силовых установок с ТВД внесло ряд принципиальных изменений не только в конструкцию, но и в практику эксплуатации самолетов и потребовало от летного и технического состава глубоких знаний особенностей работы ТВД, воздушных винтов и регулирующих агрегатов этих силовых установок. В настоящей работе и делается попытка разъяснить читателю основные особенности работы турбовинтовых силовых установок на самолете в полете и на земле и некоторые принципиальные вопросы их эксплуатации.

---

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ АГРЕГАТОВ

Одновальные и двухвальные ТВД

В настоящее время в эксплуатации находят применение два различных типа ТВД — одновальные и двухвальные.

Несмотря на то что и те и другие двигатели турбовинтовые, условия регулирования, работы воздушного винта и силовой установки в целом у этих двигателей различны.

У двухвальных двигателей (рис. 1) один вал вращает компрессор от одной турбины, а второй вал вращает винт от другой, независимой (свободной) турбины. Расход воздуха двухвального ТВД мало зависит от оборотов винта, так как число оборотов компрессора постоянно и не связано с турбиной, вращающей винт. Такой двигатель работает устойчиво в широком диапазоне оборотов воздушного винта. Однако применение раздельных турбин, работающих от общих камер сгорания, усложняет не только конструкцию самого двигателя, но и систему регулирования и управления.

Поэтому бóльшее распространение в силовых установках самолетов в настоящее время получают одновальные ТВД, у которых винт и компрессор приводятся во вращение от одного вала, имеющего одну или несколько турбин (рис. 2).

У одновальных ТВД компрессор и винт непосредственно связаны между собой и изменение оборотов винта прямо влияет на работу компрессора. При резком изменении числа оборотов винта работа компрессора может легко стать неустойчивой. Чтобы этого не случилось, применяют такую систему регулирования одновальных ТВД, которая обеспечивает постоянное значение числа оборотов во всем диапазоне режимов работы двигателя, кроме режима работы на земле на малом газе (до начала так называемой загрузки винта).

Номинальное постоянное число оборотов ТВД состав-

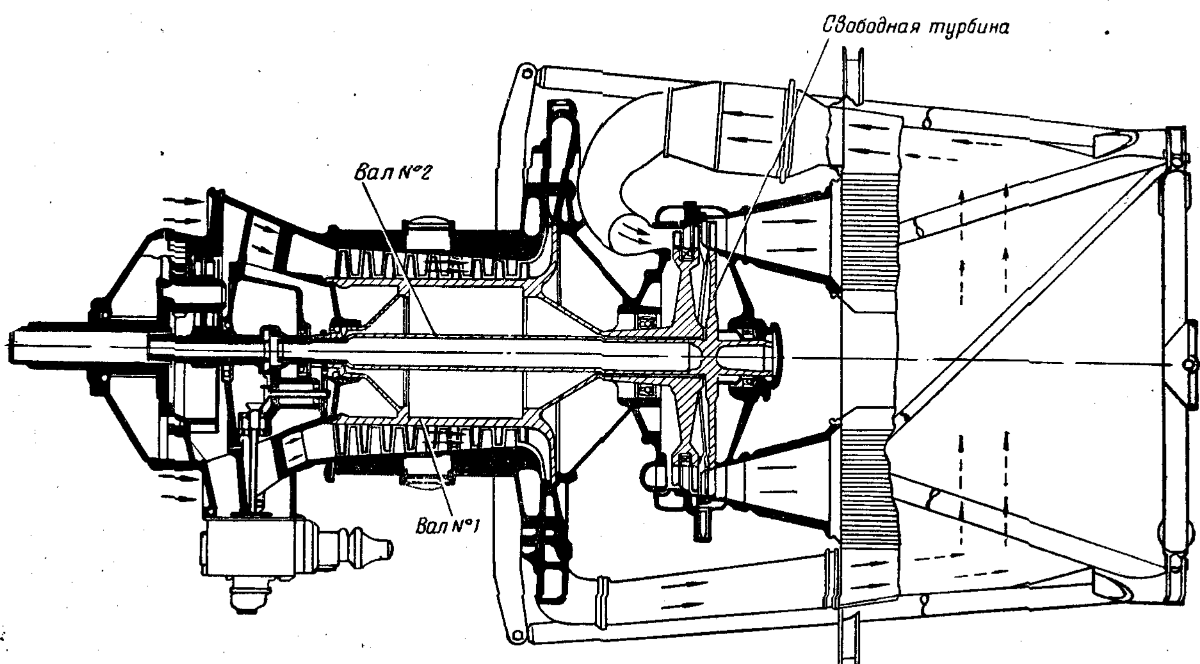


Рис. 1. Двухвальный турбовинтовой двигатель (ТВД со свободной турбиной)

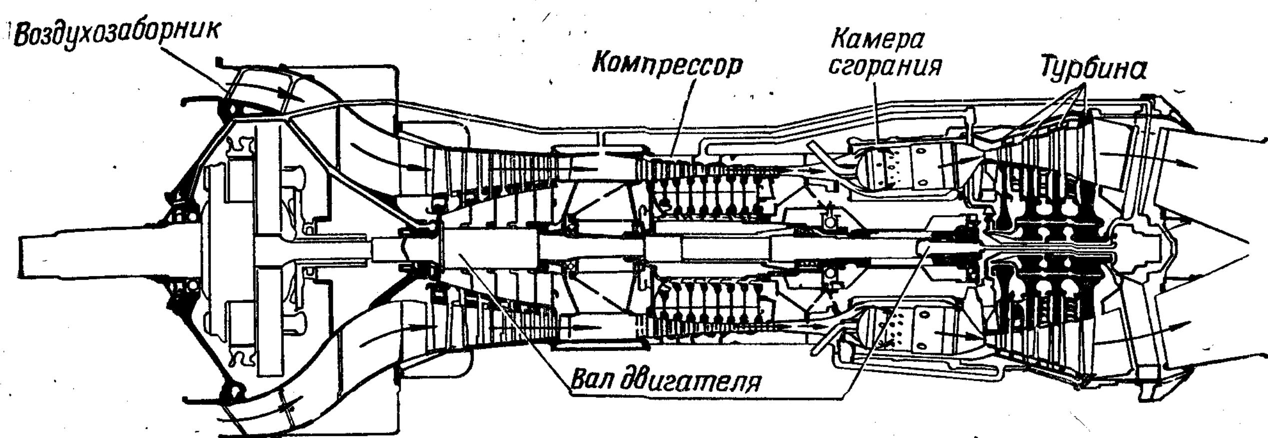


Рис. 2. Одновальный турбовинтовой двигатель

ляет 12 000—14 000 в минуту. Оно обусловливается наиболее выгодными условиями работы компрессора и турбины. Но так как такие обороты для воздушного винта совершенно неприемлемы, в конструкцию одновального ТВД включается редуктор, снижающий число оборотов винта в 10 раз и более. При пониженных таким образом оборотах воздушный винт работает с наиболее высоким к. п. д.

Для лучшего использования энергии газового потока и передачи ее винту и компрессору турбину одновального ТВД обычно делают многоступенчатой (3—4 ступени).

Как редуктор воздушного винта, так и многоступенчатая турбина значительно утяжеляют конструкцию одновального ТВД, но этим обстоятельством пренебрегают ради получения простой системы регулирования.

Для получения максимальной экономичности в ТВД, как правило, применяются осевые компрессоры.

Принцип работы современного одновального ТВД заключается в следующем (рис. 3). Через специальный воздушный канал самолета, называемый воздухозаборником, воздух из атмосферы засасывается в осевой многоступенчатый компрессор. Последовательно сжимаясь в каждой из ступеней компрессора до расчетного давления, воздух нагнетается в камеры сгорания. Здесь он делится на два самостоятельных потока. Первый поток поступает в переднюю часть камер сгорания, где имеются форсунки, непрерывно подающие топливо в распыленном виде. Смешиваясь с топливом в определенной пропорции (что достигается с помощью специальной регулирующей аппаратуры), воздух образует горючую смесь, которая, непрерывно сгорая, превращается в раскаленные газы, истекающие с высокой скоростью на лопатки турбины.

Температура этих газов чрезмерно высока. Материал камер сгорания и турбины не выдержал бы ее без дополнительного охлаждения. Для охлаждения используется второй поток воздуха. Он омывает камеры сгорания с внешней стороны, охлаждает их стенки, а затем поступает внутрь камер сгорания. Дополнительно смешиваясь с горячими газами, воздух снижает их температуру до величины, допустимой на входе в направляющий аппарат турбины.

Многоступенчатая реактивная турбина преобразует основную часть энергии горячих газов в механическую работу вращения, которая по валу передается на вращение компрессора и вала винта. Часть газов выходит через реактивное сопло, создавая дополнительную силу тяги.

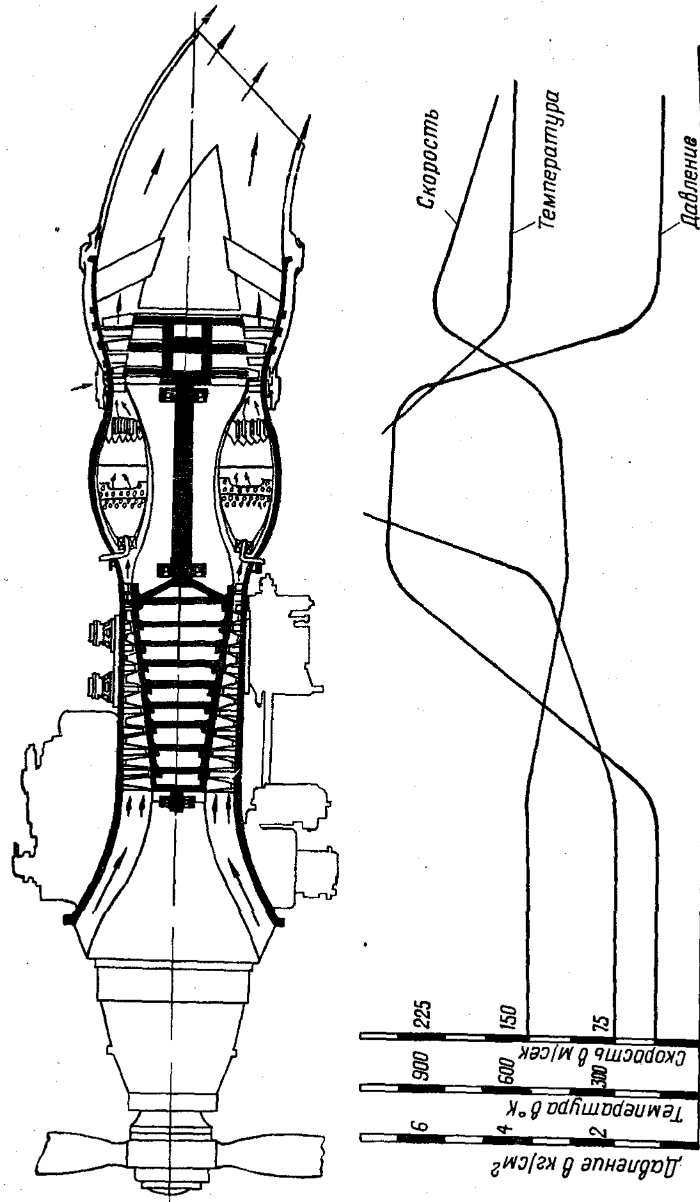


Рис. 3. Схема работы одновального турбовинтового двигателя. Изменение параметров газового потока

Тяга и мощность ТВД

На вращение компрессора расходуется бо́льшая (около $^2/_3$) часть мощности, получаемой на валу турбины, остальная часть (эффективная мощность) используется для вращения через редуктор воздушного винта и создает основную тягу силовой установки.

Чтобы иметь представление о величине и характере изменения параметров газового потока в современном ТВД, на рис. 3 приведены их значения по всему газовому тракту двигателя.

Величина тяги, развиваемой воздушным винтом в полете, может быть выражена через эффективную мощность двигателя, к. п. д. винта и скорость полета

$$P_в = 75 \frac{N_e \eta_в}{V}. \qquad (1)$$

Величина реактивной тяги, развиваемой истекающими из сопла газами, выражается такой формулой:

$$P_R = \frac{G_в}{g}(c_e - V), \qquad (2)$$

где $G_в$ — секундный весовой расход воздуха через двигатель;
c_e — скорость истечения газов из реактивного сопла двигателя;
V — скорость полета самолета.

Таким образом, полная тяга ТВД в полете будет

$$P = P_в + P_R = 75 \frac{N_e \eta_в}{V} + \frac{G_в}{g}(c_e - V). \qquad (3)$$

Для определения полной тяги ТВД на земле при $V = 0$ пользуются следующей формулой:

$$P_0 = \beta N_e + \frac{G_в c_e}{g}, \qquad (4)$$

где β — коэффициент мощности, определяющий тягу винта на месте, отнесенную к мощности, подводимой к винту.

Коэффициент $\beta = 1{,}05$—$1{,}1$. Тогда полная тяга на земле будет

$$P_0 = 1{,}1 N_e + \frac{G_в c_e}{g}. \qquad (5)$$

Определим удельную тягу ТВД. Разделив выражения (4) и (3) на $G_в$, получим

на земле

$$P_{уд_0} = \beta N_{e_{уд}} + \frac{c_e}{g}; \qquad (6)$$

в полете

$$P_{уд} = 75 N_{e_{уд}} \frac{\eta_в}{V} + P_{R_{уд}}. \qquad (7)$$

На практике обычно пользуются понятием эквивалентной мощности ТВД. Под эквивалентной мощностью $N_э$ понимается мощность, которая потребовалась бы для привода во вращение винта, развивающего тягу, равную полной тяге ТВД $(P_в + P_R)$.

Удельные мощности и тяга ТВД находятся в определенной зависимости от параметров газового потока двигателя, в первую очередь от степени повышения давления в компрессоре $\pi_к$ и от температуры газов перед турбиной $T°$. Эти зависимости показаны на графиках (рис. 4 и 5). Из графиков видно, что наибольшее значение $N_{e_{уд}}$ и $P_{R\,уд}$, а следовательно, и $P_{уд}$ получают при определенном значении $\pi_к$, равном примерно 5—7; повышение температуры газов перед турбиной приводит к увеличению $N_{e_{уд}}$ и $P_{R\,уд}$, а следовательно, и $P_{уд}$.

Зависимость удельных расходов топлива от степени повышения давления в компрессоре и температуры газов перед турбиной приведена на графиках, изображенных на рис. 6 и 7. Из рис. 7 следует, что с повышением температуры газов перед турбиной экономичность ТВД увеличивается.

Таким образом, если повышение давления в компрессоре турбовинтового двигателя выгодно лишь до определенного предела, то повышение температуры с точки зрения повышения удельной тяги и экономичности такого предела не имеет.

Иначе говоря, чем выше температура газов перед турбиной, тем выше удельная тяга и экономичность двигателя. Поэтому при конструировании ТВД ученые и инженеры рассчитывают параметры двигателя таким образом, чтобы температура на входе в газовую турбину была наибольшей, определяемой жаростойкостью материала лопаток турбины.

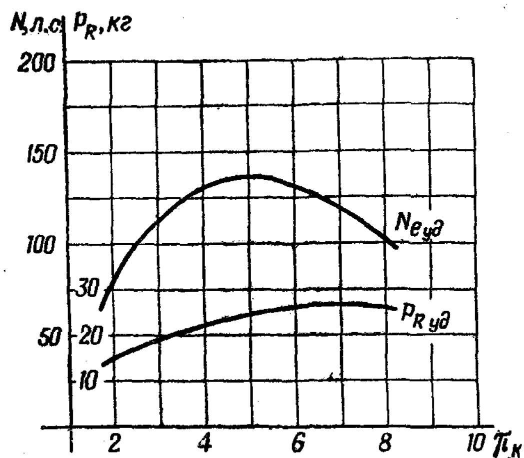


Рис. 4. Зависимость удельной мощности ТВД и удельной реактивной тяги от степени повышения давления в компрессоре

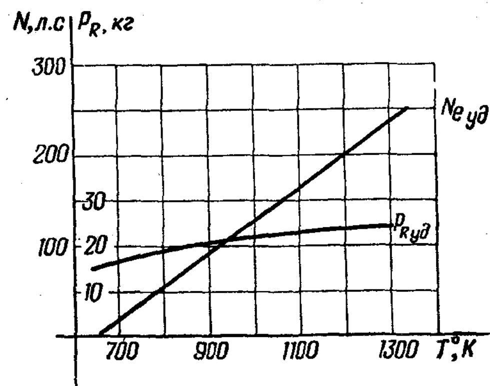


Рис. 5. Зависимость удельной мощности ТВД и удельной реактивной тяги от температуры газов перед турбиной

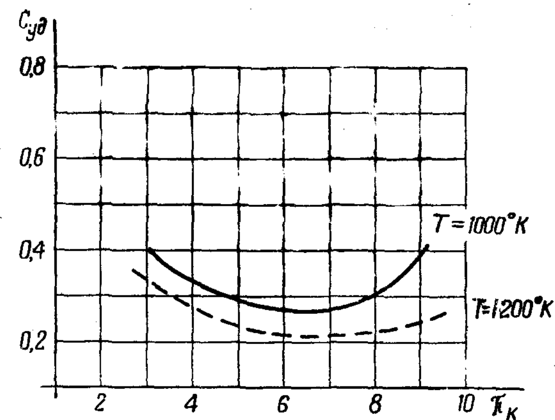


Рис. 6. Зависимость удельного расхода топлива ТВД от степени повышения давления в компрессоре $\pi_к$ при различной температуре газов перед турбиной

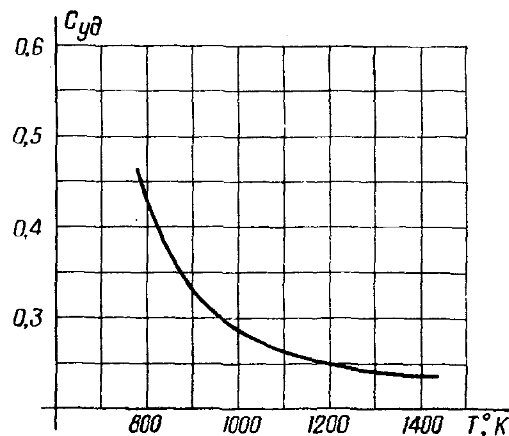


Рис. 7. Зависимость удельного расхода топлива ТВД от температуры газов перед турбиной

Большие температурные напряжения деталей газовой турбины характерны для большинства ТВД.

По сравнению с ТРД подобной мощности температурное напряжение деталей турбины ТВД более высокое. У ТРД повышение температуры газов перед турбиной более 1100—1200° К приводит к увеличению удельного расхода топлива, в связи с чем конструкторы не стремятся к чрезмерному ее повышению (рис. 8).

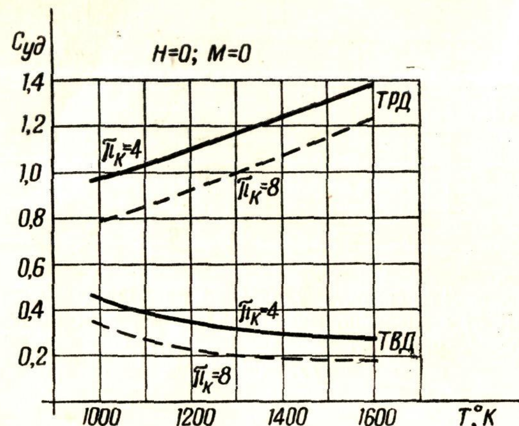


Рис. 8. Сравнительные кривые зависимости удельного расхода топлива ТРД и ТВД от температуры газов перед турбиной при различной степени повышения давления в компрессоре

Регулирование ТВД

Регулирование и управление ТВД полуавтоматическое и значительно сложнее, чем у ТРД (рассчитанного для летательных аппаратов с дозвуковой скоростью), поскольку объектом регулирования и управления, кроме двигателя, является также воздушный винт.

Регулирование двигателя осуществляется командно-топливным агрегатом (КТА), а винта — автоматическим регулятором (рис. 9).

Необходимое взаимодействие работы двигателя с винтом производится при помощи агрегатов, обычно встраиваемых в КТА и в автоматический регулятор винта.

Командно-топливный агрегат ТВД (рис. 10) подает в камеры сгорания двигателя в зависимости от ре-



Рис. 9. Схема регулирования турбовинтового двигателя

жима его работы строго определенное количество топлива. Во взаимодействии с регулятором оборотов винта КТА выполняет ряд весьма ответственных и многообразных функций, а именно:

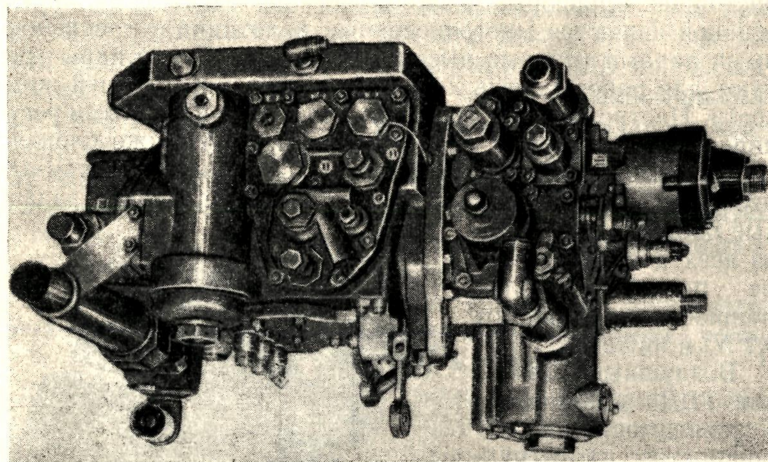


Рис. 10. Общий вид командно-топливного агрегата

— регулирует подачу топлива в двигатель на рабочих режимах;

— ограничивает предельные обороты двигателя;

— поддерживает необходимые обороты двигателя на режиме малого газа;

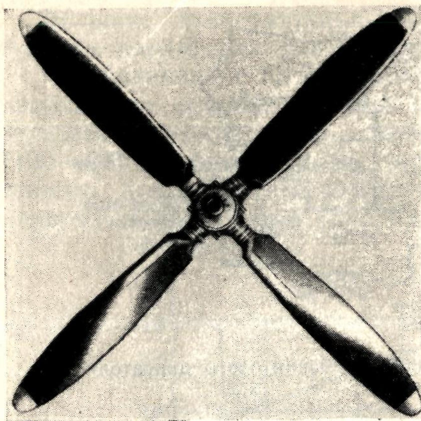


Рис. 11. Воздушный винт ТВД

— замедляет изменение подачи топлива при изменении режима работы двигателя;

— управляет подачей топлива при запуске и разгоне двигателя;

— обеспечивает остановку двигателя;

— управляет системой автоматического флюгирования винта;

— управляет клапанами перепуска воздуха из компрессора и др.

Не рассматривая детально конструкцию КТА, так как это не входит в задачу настоящей брошюры, скажем, что она очень сложна. Ее основой являются многочисленные золотники с прецизионными парами (парами высокой точности). Такие пары требуют для работы очень хорошей фильтрации рабочей жидкости. Настройка КТА производится многочисленными регулировочными винтами. В эксплуатации КТА также сложен.

Регулятор оборотов совместно с воздушным винтом-автоматом (рис. 11 и 12) автоматически поддерживают заданные обороты двигателя на всех режимах (кроме режимов малой мощности, примерно от 0,2 N_e и ниже).

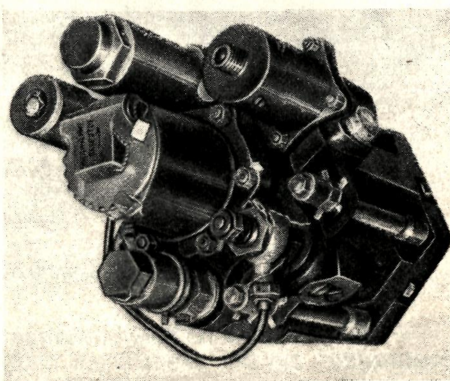


Рис. 12. Общий вид регулятора оборотов ТВД

Воздушные винты для ТВД подбираются в зависимости от его мощности, конструкции самолета и летных данных. Чем больше мощность ТВД и выше скорость полета самолета, тем сложнее конструкция воздушного винта. На наиболее мощные ТВД устанавливаются соосные многолопастные винты, вращающиеся в разные стороны. Это позволяет наиболее полно преобразовать мощность ТВД в силу тяги, но осложняет и без того громоздкое регулирование и управление силовыми установками самолета.

На современных транспортных самолетах обычно применяются однорядные винты с гидравлическим управлением шагом лопастей, работающие по двойной схеме: перевод лопастей на малый и большой шаг осуществляется под давлением масла.

На самолетах с поршневыми двигателями хорошо зарекомендовали себя в работе воздушные винты, работающие по прямой схеме: перевод на малый шаг — под давлением масла, а на большой — с помощью инерционных сил специальных противовесов. Но на ТВД такие винты не применяются из-за чрезвычайно громоздких противовесов.

Конструкция втулки воздушного винта ТВД позволяет устанавливать лопасти винта во флюгерное положение при отказе двигателя, фиксировать их на постоянном угле при раскрутке, а также переводить на минимальный угол при запуске и работе на земле. Все эти положения лопастей винта необходимы для нормальной работы ТВД на разных режимах. Так, установка лопастей винта на минимальный угол (0—2°) обеспечивает минимальное сопротивление вращению при запуске двигателя и его работе на холостом ходу. Кроме того, при таком угле лопастей в процессе пробега самолета после посадки ТВД развивает отрицательную (обратную) тягу, что используется для сокращения длины пробега самолета.

Ввод лопастей винта ТВД во флюгерное положение обеспечивает минимальное сопротивление силовой установки с ТВД при отказе двигателя в полете.

В конструкции винта ТВД обязательно предусматриваются приспособления, препятствующие созданию чрезмерной обратной тяги в полете при уборке газа или внезапном отказе двигателя.

Для определения мощности, передаваемой на винт, ТВД снабжен так называемым **индикатором крутящего момента** (ИКМ).

По показаниям давления масла в ИКМ ($P_{ИКМ}$) с помощью соответствующих формул можно точно определить мощность, передаваемую на винт ТВД на каждом режиме.

Например, для двигателя АИ-20 она определяется по формуле

$$N_в = \frac{P_{икм} n}{267,1665}, \quad (8)$$

где n — число оборотов ТВД (для АИ-20 $n = 12\,300$ *об/мин*).

Тогда

$$N_в = \frac{P_{икм} \cdot 12\,300}{267,1665} \approx 46 P_{икм}.$$

В заключение надо отметить, что автоматика управления КТА, воздушным винтом и регулятором винта обеспечивается специальной электросистемой. С ее помощью работает также и особая система автоматического флюгирования, имеющаяся на каждом ТВД (см. стр. 49).

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ТВД

Безопасные режимы работы ТВД

В полете летчик в зависимости от условий полета выбирает наивыгоднейший режим работы ТВД и устанавливает его с помощью рычага управления двигателем.

Каждый такой режим при неизменных внешних условиях (давлении, температуре наружного воздуха и т. д.) полета характеризуется числом оборотов и часовым расходом топлива.

В зависимости от этих величин и внешних условий будут изменяться мощность двигателя, температура газов перед турбиной, удельный расход топлива и другие параметры ТВД.

Это отличает ТВД от ТРД, у которого режим работы зависит лишь от одного параметра — числа оборотов, определяющего также и расход топлива.

Силовая установка с ТВД может работать в широком диапазоне изменения числа оборотов и расхода топлива, но в реальных условиях работы на самолете этот диапазон полностью использован быть не может. Этому препятствуют ограничения по устойчивости работы компрессора, невозможность превышения определенного максимального значения температуры газов перед турбиной и соображения механической прочности деталей двигателя. Вследствие этого реальные силовые установки с ТВД работают лишь в строго определенной области режимов, в так называемой о б л а с т и б е з о п а с н ы х р е ж и м о в.

На рис. 13 приведен график, на котором показаны области безопасных режимов работы турбовинтового двигателя (изменение мощности в зависимости от числа оборотов).

Кривые $G_т$ показывают значение мощности ТВД при различных расходах топлива, которые определяются поло-

жением рычага управления двигателем. Вертикальные линии, проведенные через точки *Е* и *З*, показывают ограничения, наложенные на режимы работы двигателя по максимальным оборотам (исходя из условий механической проч-

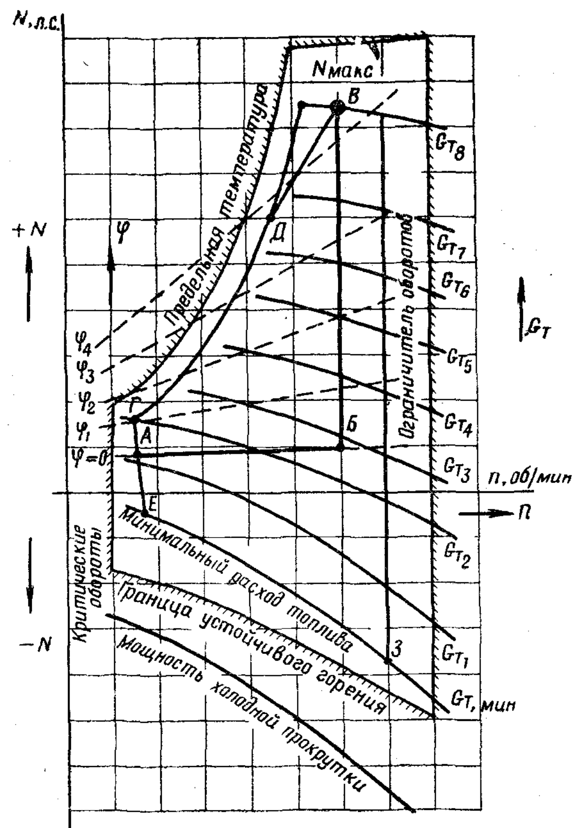


Рис. 13. Области безопасных режимов турбовинтового двигателя

ности деталей двигателя) и по минимальным (критическим) оборотам для обеспечения устойчивой работы компрессора.

Левая кривая *ГДВ* характеризует ограничение мощности и оборотов при максимально допустимой температуре газов перед турбиной. Для практического осуществления такого ограничения на некоторых ТВД устанавливается специальный автомат приемистости, который не позволяет чрезмерно увеличивать подачу топлива, не обеспечив достаточного числа оборотов турбины.

Нижняя кривая изменения мощности ограничивает область устойчивого горения. Несколько выше проходит кривая *ЕЗ* минимальных расходов, показывающая фактическое изменение минимальной мощности двигателя по оборотам. Характерно, что кривая *ЕЗ* лежит в области отрицательных мощностей, т. е. для работы двигателя при таких расходах требуется подвод мощности извне (мощности турбины не хватает для вращения компрессора и винта). Мощность в этом случае подводится за счет обдува воздушного винта встречным потоком воздуха. При этом силовая установка создает отрицательную тягу.

Ниже кривой области устойчивого горения лежит кривая мощности холодной прокрутки двигателя. Она показывает, какая мощность нужна для вращения компрессора, винта и турбины при выключенном двигателе. В полете на это расходуется энергия встречного потока воздуха, вращающего винт, а на земле — мощность стартера. При выключенном двигателе отрицательная тяга будет еще больше, чем при минимальном расходе топлива, так как турбина уже не снимает части мощности холодной прокрутки. Более подробно об образовании обратной тяги говорится в разделе 3.

Из рис. 13 видно, что турбовинтовая силовая установка при определенных сочетаниях расхода топлива и числа оборотов либо создает положительную мощность и самостоятельно вращает воздушный винт, либо требует для работы подвода мощности извне, т. е. располагает отрицательной мощностью.

Изменение мощности турбовинтового двигателя в области безопасных режимов при работе на земле, на месте, в зависимости от числа оборотов показано на рис. 14. На этом же рисунке показаны кривые изменения мощности воздушного винта в зависимости от числа оборотов и различного угла установки лопастей.

Воздушный автоматический винт ТВД при работе в полете и на земле изменяет угол установки своих лопастей в широких пределах. Для облегчения запуска двигателя лопасти винта устанавливаются на минимальный угол ($\varphi = 0$). При полете на максимальной скорости для снятия полной мощности без превышения допустимого числа оборотов лопасти винта устанавливаются на угол $\varphi = 40—45°$.

На рис. 15 изображен график изменения мощности ТВД по оборотам в полете самолета со скоростью 500 *км/час* у земли. Из графика видно, что в полете в отличие от работы ТВД на месте (см. рис. 14) одна и та же мощность развивается им при большем значении угла установки лопастей винта. Это объясняется тем, что скоростной поток

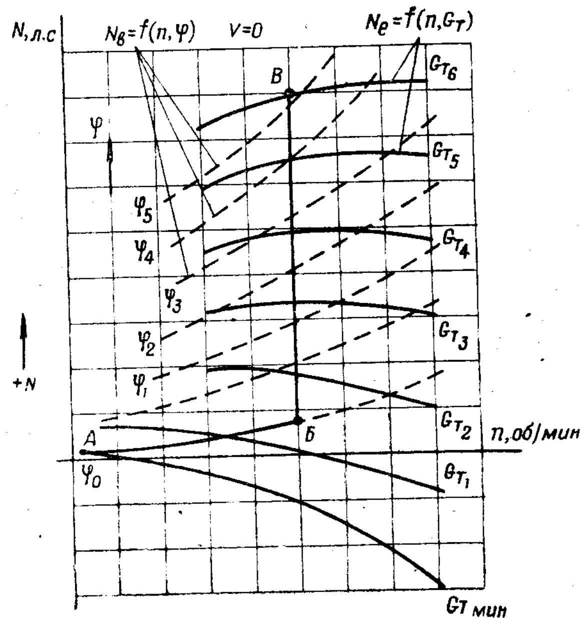


Рис. 14. Изменение мощности ТВД в зависимости от числа оборотов (при работе на земле $H = 0$, на месте $V = 0$) при различных значениях расхода топлива $G_т$ и угла установки лопастей воздушного винта φ

воздуха, обтекающий винт в полете, является источником энергии, которая дополняет энергию турбины, необходимую для раскрутки винта, поэтому для сохранения постоянного числа оборотов требуется увеличивать угол установки лопастей винта. С повышением скорости и высоты полета значение угла установки лопастей винта будет увеличиваться еще больше.

Так, например, номинальная мощность силовой установки одного из транспортных самолетов на земле, на месте, до-

стигается при угле установки лопастей винта 23°, в полете у земли со скоростью 360 *км/час* — при угле 32°, а в полете на высоте 8 000 *м* со скоростью 600 *км/час* — при угле 48°. При всех этих значениях углов лопастей сохраняется постоянное число оборотов вала ТВД.

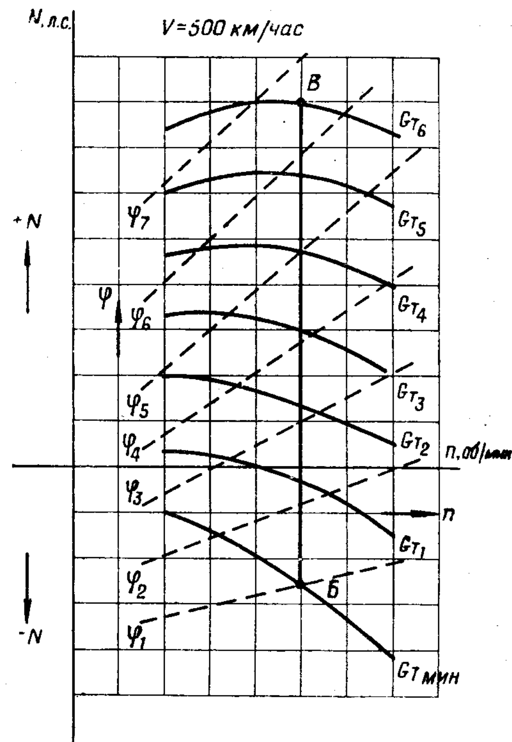


Рис. 15. Изменение мощности ТВД в зависимости от числа оборотов в полете самолета со скоростью $V = 500$ *км/час* у земли при различных значениях расхода топлива $G_т$ и угла установки лопастей воздушного винта

Для достижения высокой экономичности двигателя линия основных рабочих режимов силовой установки (дроссельная характеристика) выбирается внутри области безопасных режимов в виде вертикали постоянного числа оборотов, кроме режимов малого газа на земле. Постоянное число оборотов вала двигателя на рабочих режимах поддерживается с помощью изменения угла установки лопастей

воздушного винта, которым в свою очередь управляет регулятор оборотов ТВД.

Число оборотов на малом газе выбирается по возможности наименьшее, но несколько выше числа критических оборотов (линия *ГЕ* на рис. 13); это необходимо для обеспечения устойчивой работы двигателя при минимальной тяге без ухудшения его пусковых свойств. Поэтому и угол установки лопастей винта при этом должен быть минимальным.

Работа ТВД по дроссельной характеристике

Дроссельная характеристика турбовинтового двигателя изображена на рис. 13 и 14 линией *АБВ*, а на рис. 15 линией *БВ*. Эти линии показывают, как изменяется мощность двигателя, число оборотов его вала и угол установки винта с изменением расхода топлива (положения рычага управления двигателем).

После запуска на земле двигатель работает на режиме холостого хода (точка *А*, рис. 13 и 14); при этом все параметры соответствуют величинам этой точки: число оборотов, расход топлива и угол установки винта — минимальные. Если уменьшить подачу топлива, то двигатель с винтом без постороннего источника энергии не будет в состоянии работать и заглохнет.

При движении рычага управления двигателем (РУД) вперед подача топлива в двигатель увеличивается, растут обороты и несколько повышается мощность двигателя. Не изменяется только угол установки лопастей винта. В отличие от регуляторов оборотов поршневых двигателей регуляторы одновальных ТВД настраиваются только на определенное рабочее число оборотов, не изменяемое на всех режимах, кроме малого газа. До момента достижения двигателем этих оборотов регулятор в работу не вступает и установочный угол лопастей не изменяется. Этот период соответствует движению РУД из точки *А* в точку *Б* на рис. 13 и 14.

Когда обороты винта достигнут значения, соответствующего настройке регулятора оборотов (точка *Б*), дальнейшее их повышение прекращается, так как при последующем увеличении подачи топлива (движении РУД вперед) регулятор оборотов будет увеличивать угол установки лопастей винта. Происходит так называемая загрузка воздушного винта. При дальнейшем увеличении подачи топлива число оборотов продолжает оставаться постоянным, а изменение параметров силовой установки происходит по прямой *БВ*. В точке *В* двигатель достигает предельных (максимальных) мощности, расхода топлива и угла установки лопастей винта.

Если из этого положения снижать подачу топлива (убирать газ), то мощность будет изменяться в обратном порядке: по вертикали до точки *Б* при неизменных оборотах за счет уменьшения угла установки лопастей, причем в точке *Б* винт доходит до упора минимального шага и становится фиксированным. Дальнейшая уборка газа приводит к падению числа оборотов при минимальном шаге лопастей, вплоть до точки *А*.

Таким образом, на земле при работе двигателя на месте дроссельная характеристика ТВД (линия *АБВ*) лежит в области только положительных мощностей.

Иначе дело обстоит в полете (рис. 15, линия *БВ*).

На тех же режимах работы ТВД в полете лопасти винта вследствие действия скоростного напора воздуха устанавливаются регулятором на углы установки бóльшие, чем при работе двигателя на земле.

При уменьшении подачи топлива (уборке газа) угол установки лопастей уменьшается, но обычно не доходит до $\varphi = 0$, так как этому препятствует регулятор оборотов. В результате этого двигатель переходит на режимы отрицательной мощности, при которых для обеспечения вращения винта с числом оборотов, заданных регулятором, необходимо подводить мощность не только от турбины, но и от скоростного напора воздуха. Это одна из важнейших особенностей в работе турбовинтовой силовой установки.

Работа ТВД по высотной характеристике

Коротко рассмотрим высотную характеристику ТВД, представляющую собой кривые изменения мощности, расхода топлива (при постоянном числе оборотов) и температуры газов в зависимости от высоты и скорости полета. Высотная характеристика показана на рис. 16. Ее вид, приведенный на рисунке, обеспечивается в результате работы специального высотно-скоростного корректора подачи топлива в командно-топливном агрегате двигателя.

На больших высотах, где двигатель эксплуатируется наиболее длительное время, для обеспечения лучшей экономичности температура газов перед турбиной поддерживается постоянной (соответственно для каждого режима).

Сохранение температуры постоянной на низких высотах без снижения режима приводит к чрезмерному увеличению расхода воздуха и превышению допустимой мощности. Поэтому температуру газов перед турбиной по мере уменьшения высоты полета постепенно снижают (с определенной

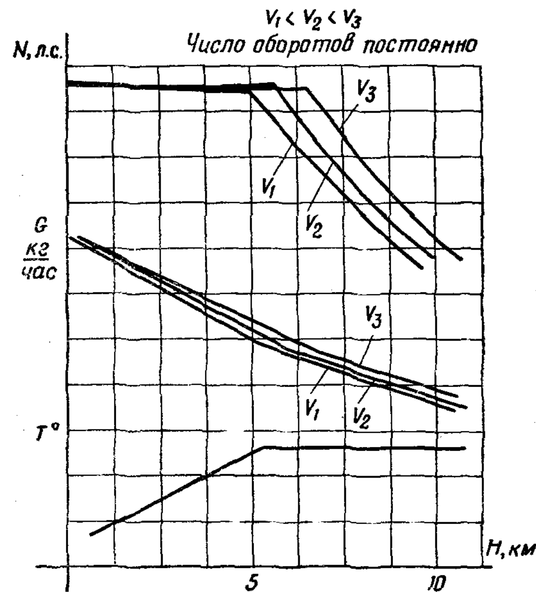


Рис. 16. Высотные характеристики ТВД. Зависимость мощности, расхода топлива и температуры газов перед турбиной от высоты полета

высоты). Ее снижение производится таким образом, чтобы мощность ТВД оставалась постоянной.

Таким образом, высотная характеристика ТВД состоит как бы из двух частей. На малых высотах мощность сохраняется постоянной, а температура газов постепенно повышается. На определенной высоте температура газов перед турбиной достигает предельно допустимого значения. С дальнейшим увеличением высоты она поддерживается постоянной, но мощность при этом падает.

Зону высот, где мощность двигателя постоянная, принято называть з о н о й   о г р а н и ч е н и я   м о щ н о с т и. Высота, на которой температура газов перед турбиной достигает предельно допустимой величины, называется в ы с о т о й   о г р а н и ч е н и я   м о щ н о с т и. Зона высот, где температура газов перед турбиной поддерживается постоянной, называется з о н о й   о г р а н и ч е н и я   т е м п е р а т у р ы   г а з о в.

Точка перегиба высотной характеристики (высота ограничения мощности) непостоянна по высоте для каждой скорости полета. Чем больше скорость полета, тем больше высота ограничения мощности, так как с увеличением скорости возрастает скоростной напор, увеличивается расход воздуха через двигатель и температура газов перед турбиной достигает максимального значения на большей высоте полета.

Все эти условия учитываются командно-топливным агрегатом, который регулирует подачу топлива в соответствии с законами обеих частей высотной характеристики.

Кроме того, КТА ограничивает подачу топлива при высоких температурах наружного воздуха (как правило, с температуры +25° и более), когда уменьшение весового расхода воздуха может привести к чрезмерному повышению температуры газов перед турбиной.

Расход топлива по мере увеличения высоты снижается, как показано на рис. 16.

В заключение следует сказать, что на большинстве ТВД во избежание возникновения помпажа при запуске двигателя производится перепуск воздуха из компрессора в атмосферу. В момент запуска и до выхода двигателя на определенное число оборотов клапаны перепуска открываются и излишний воздух перепускается в атмосферу. При достижении определенного числа оборотов клапаны закрываются, так как при больших оборотах компрессор работает устойчиво.

---

3. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ТЯГА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ТВД И СПОСОБЫ ЕЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Условия образования отрицательной тяги

Из всех изложенных выше особенностей работы силовой установки с ТВД наибольшее значение для практической эксплуатации ТВД имеет способность его в определенные моменты работы создавать отрицательную тягу.

Внезапное возникновение отрицательной тяги в полете при недостаточных практических навыках летного состава может привести к весьма тяжелым последствиям. Но это свойство ТВД используется и как положительное — для торможения самолетов, например при пробеге после посадки.

Для того чтобы не допустить самопроизвольного возникновения отрицательной тяги, в регуляторах ТВД и воздушных винтов имеются предохранительные устройства, в том числе и автоматические. Вместе с тем практика производства и эксплуатации ТВД показала, что изготовить автомат, действующий в полете в различных условиях, крайне трудно и его конструкция не может быть абсолютно безотказной.

Появление отрицательной тяги возможно на любой силовой установке при наличии воздушного винта как движителя.

Отрицательная тяга в полете возникала и на самолетах с поршневыми двигателями при определенных значениях скорости вращения винта (числа оборотов) и поступательной скорости полета (рис. 17).

На рис. 17, *а* показан элемент лопасти воздушного винта, вращающегося с определенным числом оборотов (а следовательно, со скоростью $u = \omega \cdot r$), на самолете, который летит с поступательной скоростью V. Угол атаки элемента α (между вектором суммарной скорости набегающего потока W

и хордой элемента) и его элементарная сила тяги P положительны.

Если при указанной выше скорости полета, не изменяя угла установки лопасти, снизить число оборотов, то угол атаки α станет отрицательным, следовательно, отрицательной станет и сила тяги, причем величина ее будет тем больше, чем меньше число оборотов.

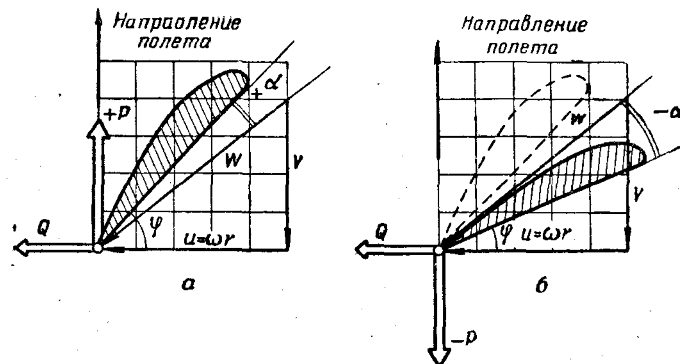


Рис. 17. Работа элемента лопасти воздушного винта:
а — тяга положительная; *б* — тяга отрицательная

Подобное явление возможно и при резком увеличении скорости полета V при постоянных оборотах и постоянном угле установки винта.

Отрицательную тягу можно получить также в том случае, если уменьшить угол установки лопастей винта, сохранив постоянными число оборотов и скорость полета (рис. 17, *б*).

Наиболее опасно возникновение отрицательной тяги при отказе в полете одного из двигателей. Отрицательная тяга вращающегося винта неработающего двигателя создает сопротивление, на преодоление которого затрачивается значительная часть мощности работающих силовых установок. Вращение лопастей винта неработающего двигателя под действием набегающего потока воздуха называется, как известно, авторотацией (самовращением). Авторотация винта ТВД практически может происходить при различных углах установки лопастей и во всем диапазоне возможных скоростей полета самолета; при этом всегда образуется и действует отрицательная тяга, создавая сильнейшее дополнительное сопротивление полету.

Резко уменьшить сопротивление, а следовательно, и облегчить пилотирование самолетом удается путем ввода лопастей винта неработающей силовой установки во флюгерное положение. Подобным приемом пользуются на самолетах с поршневыми двигателями. Так же поступают и на самолетах с ТВД.

Однако между этими силовыми установками имеется огромное различие в величине создаваемой ими отрицательной тяги. Силовая установка с ТВД может создавать отрицательную тягу в несколько десятков раз бо́льшую, чем установка с поршневым двигателем. Это объясняется разницей мощностей этих установок и диапазонов изменения углов установки винтов на турбовинтовом и поршневом двигателях. На поршневом двигателе лопасти винта имеют минимальный угол установки 19—20° и небольшой диапазон изменения углов 20—25°. Невозможность дальнейшего уменьшения угла установки лопастей винта у поршневого двигателя и обеспечивает сравнительно небольшую величину отрицательной тяги при переходе винта на авторотацию (в случае отказа двигателя).

Иначе обстоит дело при эксплуатации самолета с ТВД [1]. Для запуска такого двигателя требуется очень большой крутящий момент, значительно превосходящий пусковой момент поршневого двигателя, так как мощность холодной прокрутки ТВД зависит от числа оборотов примерно в третьей степени, а поршневого двигателя — в первой. Кроме того, в процессе запуска ТВД необходимо его ротор раскрутить до более высокого числа оборотов, чем вал поршневого двигателя. В противном случае ТВД будет работать на малых оборотах неустойчиво.

Для максимального упрощения процесса запуска ТВД стремятся всемерно облегчить систему «компрессор — винт», для чего запуск ТВД производят при минимальном установочном угле лопастей воздушного винта, величина которого составляет обычно не более 2—3° и часто равна нулю ($\varphi = 0$). Запускать ТВД при положении лопастей винта на угле 19—20° (как у поршневого двигателя) крайне нецелесообразно, так как это приводит к необходимости резкого увеличения мощности пусковых средств и значительному повышению минимальных оборотов ТВД для обеспечения устойчивой работы двигателя при затяжеленном винте.

Из рис. 17, *б* видно, что если, не изменяя оборотов винта и скорости полета самолета, значительно уменьшить угол его установки (до 0° или близкого к нему значения), то угол атаки элемента лопасти станет отрицательным, а это повлечет в полете к возникновению отрицательной тяги, которая будет расти с уменьшением α (увеличением его отрицательного значения).

[1] Дальнейшие объяснения справедливы только для одновальных ТВД.

Иначе говоря, *силовая установка с ТВД может создать большую отрицательную тягу главным образом в тот момент, когда в полете при определенных условиях лопасти винта перейдут на малый установочный угол, близкий к* $\varphi = 0$.

Поршневой двигатель, имея $\varphi = 19$—$20°$, такой возможности не имеет.

Следует уточнить, что здесь речь идет об о ч е н ь б о л ь ш о й отрицательной тяге. Незначительная отрицательная тяга может возникать в полете и без перехода лопастей на $\varphi = 0$, о чем будет сказано далее.

Укажем на условия, при которых лопасти винта могут перейти на малые углы установки и образовать большую отрицательную тягу.

Главным условием является стремление лопастей винта в полете под действием аэродинамических и массовых сил перейти на минимальный угол установки. И только регулятор оборотов с помощью давления масла, подаваемого во втулку винта, удерживает лопасти от перемещения.

Другим условием является стремление регулятора оборотов ТВД поддерживать постоянное число оборотов винта в полете лишь в определенном диапазоне оборотов двигателя. В отличие от регуляторов постоянных оборотов поршневых двигателей регуляторы ТВД настраиваются на одно постоянное, сравнительно высокое, число оборотов, и если двигатель в силу каких-либо причин этих оборотов развить не может, то регулятор не в состоянии предотвратить уход лопастей винта ТВД на $\varphi°_{мин}$.

Таким образом, если в полете произойдет отказ в системе регулирования двигателя или летчик сам уменьшит мощность двигателя настолько, что двигатель не в состоянии при данной скорости полета развить число оборотов настройки регулятора, то лопасти воздушного винта выйдут из-под контроля регулятора и под действием массовых и аэродинамических сил перейдут на малый шаг, создавая при этом большую отрицательную тягу.

Более подробно этот процесс, имеющий ряд особенностей, будет изложен ниже.

Промежуточный упор лопастей

Необходимо указать, что в конструкции винта ТВД предусматриваются специальные приспособления, ограничивающие величину отрицательной тяги. Одним из таких приспособлений является так называемый промежуточный упор лопастей, который включается перед взлетом; в полете он в случае отказа двигателя препятствует достижению лопастями минимального угла установки.

При запуске и при рулении самолета по земле лопасти ТВД работают на минимальном угле, а в полете — в диапазоне углов между промежуточным упором и наибольшим углом установки лопастей.

Величина угла промежуточного упора лопастей не одинакова у разных ТВД и самолетов; она устанавливается такой, чтобы не допустить появления опасной для полета отрицательной тяги.

Выше упоминалось, что отрицательная тяга имеет и положительное значение. Она с успехом используется на всех самолетах с ТВД для сокращения пробега по взлетно-посадочной полосе (ВПП) при посадке. Это выполняется следующим образом. Летчик во время приземления самолета с помощью электромеханизма снимает винты с промежуточного упора; при этом лопасти винта встают на минимальный угол. Образующаяся в этом случае отрицательная тяга служит тормозом и значительно сокращает пробег самолета по ВПП.

Таким образом, **при установке лопастей винтов ТВД на промежуточный упор исключается возможность возникновения большой отрицательной тяги в полете, а при снятии лопастей с упора после посадки самолета обеспечивается эффективное торможение и резкое уменьшение длины пробега.**

Из сказанного следует, что угол промежуточного упора должен быть по возможности большим, чтобы в случае отказа двигателя не возникло большой отрицательной тяги. Если учитывать только это обстоятельство, упор лопастей винта следовало бы ставить на угле, превышающем 20°. Но тогда во время посадки самолета с работающим двигателем была бы невозможна устойчивая работа ТВД на минимально допустимых оборотах и посадочной скорости, так как для этих условий винт был бы «тяжел». Дело в том, что

при небольших расходах топлива (на режимах нулевой тяги и ниже) мощности турбины двигателя не хватает для вращения компрессора и винта, стоящего на промежуточном упоре с углом более 20°. При работе на месте двигатель «потерял» бы обороты и заглох. В полете же вращению винта помогает набегающий поток воздуха. С уменьшением скорости полета эта «помощь» ослабевает. И ввиду того, что лопасти винта в этом случае доходят до упора, дальнейшего облегчения винта не происходит. Двигатель теперь не в состоянии удерживать минимально возможные для устойчивой работы компрессора обороты. Начнется помпаж, в результате которого ТВД выйдет из строя.

Учитывая эти обстоятельства, угол (его величину) промежуточного упора выбирают таким, чтобы лопасти винта, находясь на этом угле, обеспечивали не очень большую отрицательную тягу при случайной остановке двигателя и устойчивую работу последнего при посадке. Это значение угла промежуточного упора колеблется у разных силовых установок с ТВД примерно от 10 до 20°.

С целью уменьшения отрицательной тяги ТВД на всех самолетах с этими двигателями дополнительно еще ставится проходная защелка на рычаг управления двигателем, не допускающая полной уборки газа в полете и снижения расхода топлива настолько, чтобы возникла большая отрицательная тяга. Уборка рычага управления двигателем за проходную защелку в полете у земли производится летчиком только при приземлении самолета, перед снятием винтов с упора. Такой прием гарантирует максимальное торможение (величину отрицательной тяги), так как винт устанавливается на наименьший угол. Расход топлива при этом минимальный, но достаточный для устойчивой работы двигателя.

Однако на этом, пожалуй, исчерпывается положительное влияние отрицательной тяги на летные качества самолетов с ТВД.

Значительно больше это явление приносит неприятностей, заставляя конструкторов устанавливать сложные системы автоматического флюгирования винтов, а летный состав постоянно быть настороже, быстро флюгировать винты и принимать другие необходимые меры для сохранения режима полета при внезапном отказе какого-либо агрегата ТВД.

Зависимость отрицательной тяги от расхода топлива и скорости полета

Выше указывались условия, при которых происходит образование отрицательной тяги на ТВД. Рассмотрим эти явления более подробно.

Как известно, отрицательная тяга силовой установки с ТВД возникает в полете всякий раз, когда мощность турбины недостаточна для вращения винта с заданным числом оборотов при данном угле установки лопастей.

На исправно работающем ТВД в полете такое явление возможно в двух случаях: либо при увеличении скорости полета самолета выше значения, соответствующего данному режиму работы двигателя, либо при уборке рычага управления двигателем за проходную защелку на любой возможной скорости полета (т. е. при работе ТВД на режиме малого газа и ниже). Поясним эти положения.

Каждая скорость полета самолета с ТВД определяется соответствующей мощностью работы двигателей. Если, не увеличивая мощности ТВД, увеличить скорость полета (например, на снижении), то винт, поддерживая постоянное число оборотов, затяжелится и мощности турбины не хватит для вращения винта. Этот недостаток будет восполняться энергией встречного потока воздуха, но при этом возникнет отрицательная тяга. Величина ее будет незначительна, так как лопасти воздушного винта с помощью регулятора оборотов перейдут на угол, бо́льший, чем тот, при котором они работали до увеличения скорости.

При уборке рычага управления двигателем за проходную защелку мощность турбины резко падает и отрицательная тяга может достичь очень большой величины. Чем меньше мощность (расход топлива), тем больше отрицательная тяга.

На рис. 18 показано изменение тяги ТВД в зависимости от расхода топлива и скорости полета. Из рисунка видно, что при малых скоростях полета у земли величина тяги при расходе $G_т^1$ (номинал), $G_т^2$ (крейсерский режим) и $G_т^3$ (рычаг управления двигателем на промежуточной защелке) положительна. Для уточнения оговоримся, что последнее верно лишь для температуры наружного воздуха, близкой к стандартной (+15° С).

Снижение расхода топлива до $G_т^4$ (рычаг управления двигателем за промежуточной защелкой) и $G_{т_{мин}}$ (земной малый газ) приводит к появлению отрицательной тяги, зна-

чение которой увеличивается с падением скорости полета и уменьшением расхода топлива. Своего максимального значения она достигает в случае выключения (или отказа) двигателя.

Однако и в этом случае ее величина существенно зависит от скорости полета. Все дело тут во взаимодействии

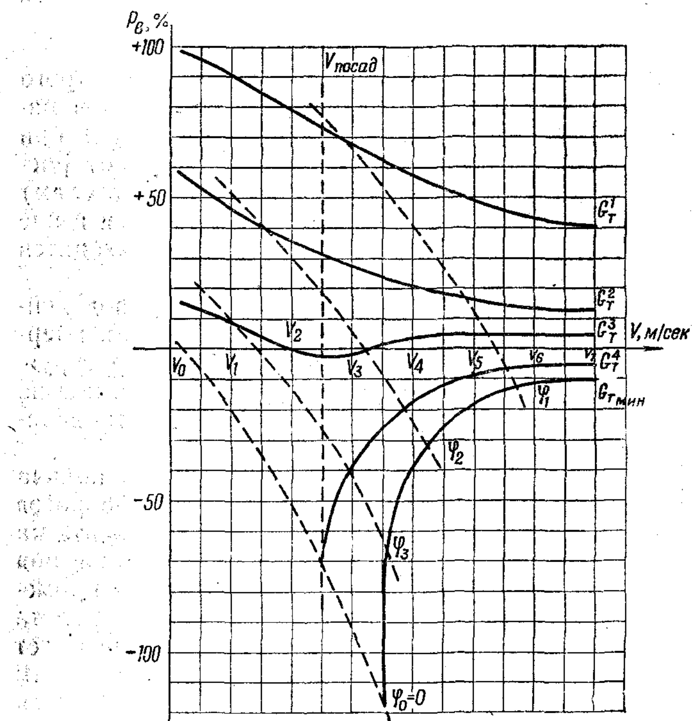


Рис. 18. Изменение тяги ТВД в зависимости от расхода топлива и скорости полета

винта, двигателя и регулятора оборотов. Если бы воздушный винт ТВД был винтом фиксированного шага, то при отказе двигателя величина отрицательной тяги вырастала бы пропорционально увеличению скорости полета. Чем выше была бы скорость полета, тем до большего числа оборотов воздушный поток раскручивал бы воздушный винт и тем больше была бы отрицательная тяга.

Но на всех ТВД, как уже указывалось ранее, устанавливаются винты с автоматическим изменением шага лопастей в широком диапазоне, вследствие чего картина изменения величины отрицательной тяги коренным образом меняется.

На больших скоростях полета абсолютная величина отрицательной тяги оказывается значительно меньше, чем на малых скоростях.

Поясним сущность этого явления.

В полете ТВД работает, как известно, при одном строго определенном числе оборотов, равном числу оборотов настройки регулятора. Лопасти воздушного винта ТВД при этом устанавливаются регулятором в зависимости от расхода топлива (положения рычага управления двигателем) и фактической скорости полета. Чем больше дан газ и выше скорость полета, тем на большем угле установки находятся лопасти воздушного винта.

При отказе двигателя его мощность падает и под действием аэродинамических сил набегающего потока и инерционных сил лопасти воздушного винта, авторотируя, уменьшают установочный угол и винт будет облегчаться. Обороты авторотации будут стремиться превысить величину настроенных оборотов регулятора.

Однако регулятор оборотов (если не нарушена подача масла в регулятор и винт) не допустит увеличения оборотов более числа оборотов настройки и ухода лопастей винта на минимальный угол. Вследствие этого лопасти винта под воздействием регулятора установятся на каком-то промежуточном угле, соответствующем данной скорости полета и числу оборотов настройки регулятора. Чем выше будет скорость полета самолета после отказа ТВД, тем бо́льшим будет этот промежуточный угол установки лопастей. Но, конечно, он будет меньше того угла, на котором были установлены лопасти винта, когда двигатель работал. Ведь тогда винт вращался под действием турбины, а не только набегающего потока воздуха.

Величина возникающей при этом отрицательной тяги не будет значительной, так как лопасти винта установлены регулятором не на минимальный угол.

При дальнейшем полете без изменения скорости винт будет авторотировать на заданном числе оборотов, или, как принято говорить, авторотировать **под контролем регулятора оборотов**. При незначительном увеличении скорости регулятор затяжелит винт, при уменьшении — облегчит, но обороты сохранятся и величина отрицательной тяги будет примерно одинакова.

Однако не на всех скоростях полета дело обстоит так благополучно.

Оказывается, что авторотация винта отказавшего двигателя под контролем регулятора возможна только на такой скорости полета, при которой винт может быть раскручен встречным потоком воздуха до числа оборотов, бо́льшего или равного числу оборотов настройки регулятора. На рис. 19 показано изменение числа оборотов авторотации в зависимости от скорости полета у воздушного винта, зафиксированного на различных углах установки. Из рисунка видно, что при одинаковом угле установки лопастей они могут быть раскручены встречным потоком воздуха тем больше, чем выше будет скорость полета самолета.

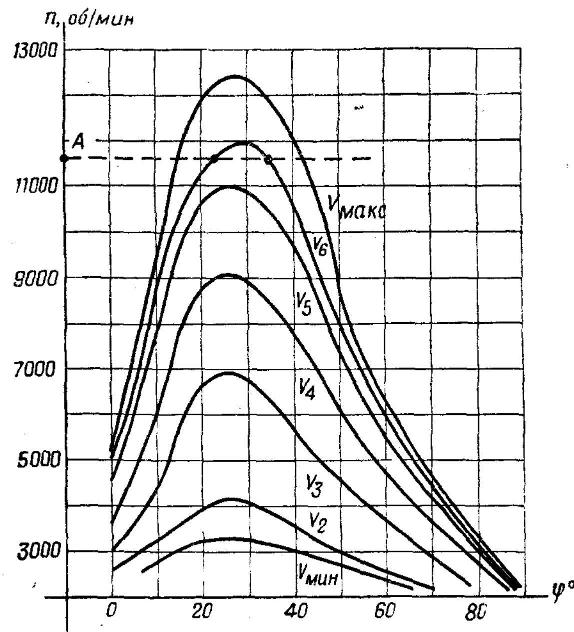


Рис. 19. Зависимость числа оборотов авторотации воздушного винта при различных углах установки лопастей винта и скоростях полета самолета

Если принять, что число оборотов настройки регулятора равно величине А, то оно может быть достигнуто при авторотации винта только на скорости полета, равной или большей, чем V_6. Если скорость полета после отказа двигателя для достижения таких оборотов недостаточна (например, V_4 или V_5 на рис. 19), то винт выходит из-под контроля регулятора и попадает в неустойчивый режим авторотации. При этом может развиться огромная отрицательная тяга, превосходящая по своей абсолютной величине положительную тягу ТВД, работающего на взлетном режиме. Какова причина появления этой тяги?

Назовем минимальную скорость полета, при которой возможна авторотация винта с числом оборотов, равным числу оборотов настройки регулятора, скоростью контроля регулятора ($V_{кон}$).

Предположим, что в момент отказа скорость полета оказалась меньше скорости контроля регулятора и, следовательно, при любом положении угла лопастей винт не в состоянии вращаться с числом оборотов, равным числу оборотов настройки регулятора. На рис. 20 показано изменение числа оборотов, угла установки лопастей винта и величины отрицательной тяги по времени с момента отказа (или выключения) двигателя в полете со скоростью, меньшей скорости контроля регулятора.

В первый момент после отказа ТВД обороты еще продержатся на прежнем уровне 1—2 *сек*, так как регулятор, стремясь поддержать обороты, резко уменьшит угол установки лопастей. Затем обороты начнут падать, а лопасти винта, дойдя до упора в этом положении, зафиксируются.

Теперь винт ТВД станет обычным винтом фиксированного шага, авторотирующим под действием набегающего потока воздуха. Число оборотов, при котором будет авторотировать такой винт, определяется скоростью полета самолета с неработающим двигателем и углом установки лопастей, на котором они зафиксируются (рис. 19). Чем меньше скорость полета, тем меньше будет число оборотов авторотации и тем меньше отрицательная тяга, создаваемая авторотирующим винтом.

Максимальная отрицательная тяга в данном случае возникает в первый момент неустойчивой авторотации, когда обороты еще высокие, а винт ушел на минимальный угол и встал на упор. Чем меньше будет угол, на котором зафикси-

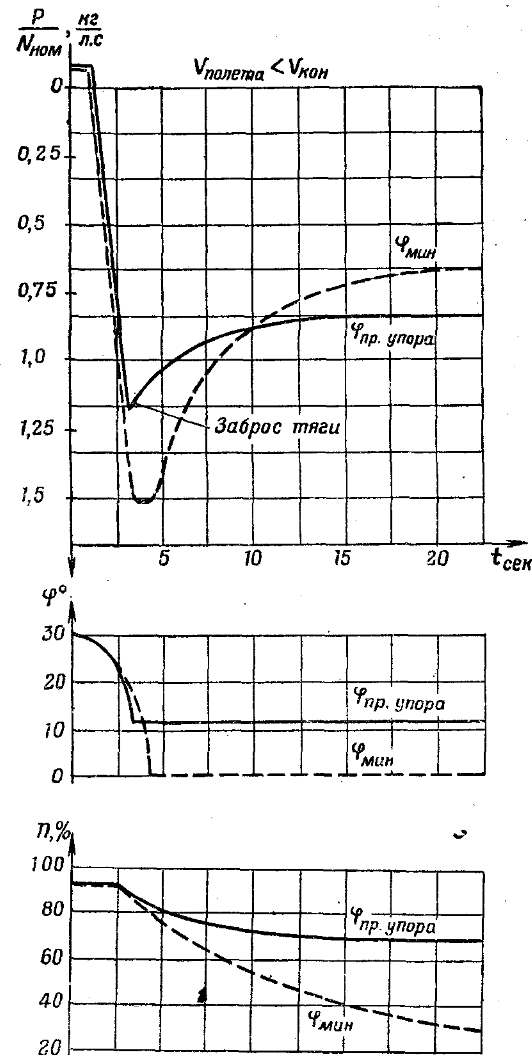


Рис. 20. Изменение тяги ТВД, угла установки лопастей винта и числа оборотов двигателя по времени с момента отказа (или выключения) двигателя в полете

руются лопасти, и чем ближе будет скорость полета самолета к скорости контроля регулятора, тем бо́льшей будет величина возникающей отрицательной тяги.

Этот период равен 2—3 *сек* и в практике полетов получил название «заброса тяги» или «броска», ввиду того что в этот момент самолет бросает в сторону отказавшего двигателя.

В дальнейшем с переходом винта на устойчивую авторотацию при зафиксированных лопастях и снижении числа оборотов величина отрицательной тяги уменьшается.

Выше говорилось об установке промежуточного упора лопастей. Если промежуточный упор включен в полете (что и нужно делать), то при отказе двигателя лопасти не смогут дойти до $\varphi_{мин}$, а остановятся на этом упоре. Отрицательная тяга не достигнет максимума, и сила «броска» будет ослаблена. Указанное обстоятельство является основной причиной введения промежуточного упора лопастей.

Интересно, что если по какой-либо причине ввести лопасти винта во флюгерное положение нельзя или проводится специальная тренировка в полете с авторотирующим винтом, то оказывается невыгодным после «броска» удерживать винт на промежуточном упоре вследствие того, что число оборотов устойчивой авторотации винта на промежуточном упоре (при данной скорости), а вместе с ним и величина отрицательной тяги получаются больше числа оборотов авторотации и отрицательной тяги на $\varphi_{мин}$.

Поэтому, если необходимо продолжать полет с авторотирующим винтом, то после «броска» следует винт с упора снять. Его лопасти дойдут до $\varphi_{мин}$, число оборотов снизится и отрицательная тяга уменьшится. Тем самым облегчаются условия дальнейшего полета с авторотирующим винтом.

Таким образом, в явлении образования отрицательной тяги на отказавшей силовой установке ТВД в полете имеются две различные области: область высоких скоростей, когда винт авторотирует под контролем регулятора, и область низких скоростей, характеризующаяся неустойчивой авторотацией в начальной фазе с последующим выходом винта на упор угла лопастей и продолжением его работы как винта фиксированного шага. Наибольшую трудность для продолжения полета самолета имеет авторотация винта в области низких скоростей, так как величина возникающей при этом отрицательной тяги огромна. Кроме того, в этой области находятся такие ответственные элементы полета, как планирование и посадка самолета.

Границей между указанными областями является скорость контроля регулятора, о которой было сказано выше.

Следовательно, если полет совершается при скорости, равной или меньшей скорости контроля регулятора, экипаж должен быть всегда внимателен, быстро распознавать признаки отказа двигателя и своевременно принимать необходимые меры по флюгированию воздушного винта — единственного надежного способа борьбы с отрицательной тягой. К сожалению, скорость контроля регулятора для современных турбовинтовых транспортных самолетов сравнительно высока. Она составляет около 500 *км/час*, так что все основные режимы длительной эксплуатации самолета: горизонтальный полет, набор высоты, планирование и посадка — лежат ниже этого рубежа. В связи с этим экипаж должен быть все время настороже, особенно при посадке.

Влияние температуры наружного воздуха на образование отрицательной тяги

На величину отрицательной тяги при посадке самолета и на значение скорости, при которой образуется эта тяга, оказывает влияние температура наружного воздуха.

Как указывалось выше, отрицательная тяга возникает не только при отказе ТВД, но и при уборке рычага управления двигателем за проходную защелку. Причем, чем бо́льшая мощность требуется для вращения компрессора и винта, тем больше (при неизменной мощности турбины) будет и отрицательная тяга.

Наблюдая за образованием отрицательной тяги при разной температуре наружного воздуха, можно заметить, что при работе двигателя на малом газе температура почти не влияет на подачу топлива, а следовательно, и на мощность турбины, в то время как мощность, потребная для вращения компрессора, с падением температуры наружного воздуха значительно возрастает. Это происходит вследствие того, что при этом плотность воздуха повышается, следовательно, весовой расход воздуха возрастает. Увеличение весового расхода воздуха требует повышенной мощности для вращения компрессора. Она создается набегающим потоком, но самолет при этом, естественно, испытывает воздействие увеличенной (по сравнению с более высокими температурами) отрицательной тяги.

Однако понижение температуры влияет не только на увеличение абсолютного значения отрицательной тяги. При значительном понижении температуры наружного воздуха (до 20—25° С) возможно появление отрицательной тяги на силовой установке во время посадки при положении рычага управления двигателем на проходной защелке, т. е. в том положении, когда в обычных условиях отрицательная тяга не возникает. Чтобы этого не происходило (т. е. чтобы при посадке тяга силовой установки была нулевой), само положение проходной защелки должно меняться в зависимости от температуры наружного воздуха: в сторону меньших расходов при повышении температуры и больших — при понижении.

Перед посадкой летчик всегда имеет возможность запросить диспетчера аэродрома об условиях посадки, в том числе и о температуре, и установить проходную защелку в положение, соответствующее нулевой тяге.

Температура наружного воздуха влияет также и на величину скорости контроля регулятора: скорость увеличивается с понижением температуры. Появление отрицательной тяги винта возможно и при высокой температуре наружного воздуха (выше +25° С). Дело в том, что при такой температуре происходит автоматическое уменьшение расхода топлива двигателя командно-топливным агрегатом, что равносильно уборке рычага управления двигателем на малые расходы топлива. Это еще больше расширяет зону скоростей полета самолета с ТВД, в которой возможно возникновение большой отрицательной тяги.

Полет с авторотирующим винтом. Вывод винта из флюгерного положения

Рассмотрим явления, возникающие при полете и посадке самолета с одним отказавшим двигателем и винтом в режиме авторотации. Это может иметь место при неисправности аппаратуры, переводящей винт отказавшего двигателя во флюгерное положение, а также при тренировочных полетах на режиме авторотации, когда винт выключенного двигателя сознательно не вводится во флюгерное положение.

Очевидно, что и в первом и во втором случаях следует стремиться к тому, чтобы отрицательная тяга авторотирующего винта не превышала допустимой величины.

Если полет с одним неработающим двигателем производится со скоростью, меньшей скорости контроля регулятора, для уменьшения величины отрицательной тяги имеется возможность установить лопасти винта либо на промежуточный упор, либо на минимальный угол. Выше указывалось, что после выключения двигателя, у которого винт поставлен на промежуточном упоре, выгоднее лопасти винта с него снять и поставить в положение минимального угла $\varphi = 0$. При этом угле лопастей винт авторотирует на меньшем числе оборотов и отрицательная тяга невелика.

Полет с одним неработающим двигателем и авторотирующим винтом в зоне скоростей, меньших скорости контроля регулятора, следует производить с наименьшей скоростью. При этом отрицательная тяга будет сравнительно небольшой и при посадке каких-либо неожиданных явлений для летчика не произойдет.

Если же после отказа или выключения двигателя (для тренировки) мощность работающих двигателей увеличить настолько, что возможно будет продолжать полет при скорости, большей скорости контроля регулятора, то отрицательная тяга будет совсем незначительна. Однако при заходе на посадку и при уменьшении скорости полета в момент прохода через скорость контроля регулятора произойдет внезапный «заброс тяги», к парированию которого надо быть готовым. Дальнейший полет следует производить на наименьшей скорости, как указывалось выше.

Особо остановимся на рассмотрении явлений, возникающих при выводе винта ТВД из флюгерного положения в полете. Такое положение может возникнуть при запуске двигателя в процессе тренировочного полета после флюгирования винта в учебных целях, когда посадку хочется произвести при всех работающих двигателях.

Для осуществления этой операции лопасти винта сначала выводят из флюгерного положения с помощью специального маслонасоса, а затем, когда винт начнет вращаться, включают зажигание и подачу топлива. Двигатель запускается при положении лопастей на промежуточном упоре, но когда обороты винта с помощью работающей турбины достигают величины, равной оборотам настройки регулятора, лопасти винта затяжеляются до угла, соответствующего режиму работы двигателя и скорости полета, и ТВД переходит на заданный режим.

В процессе запуска двигателя, как только начинается

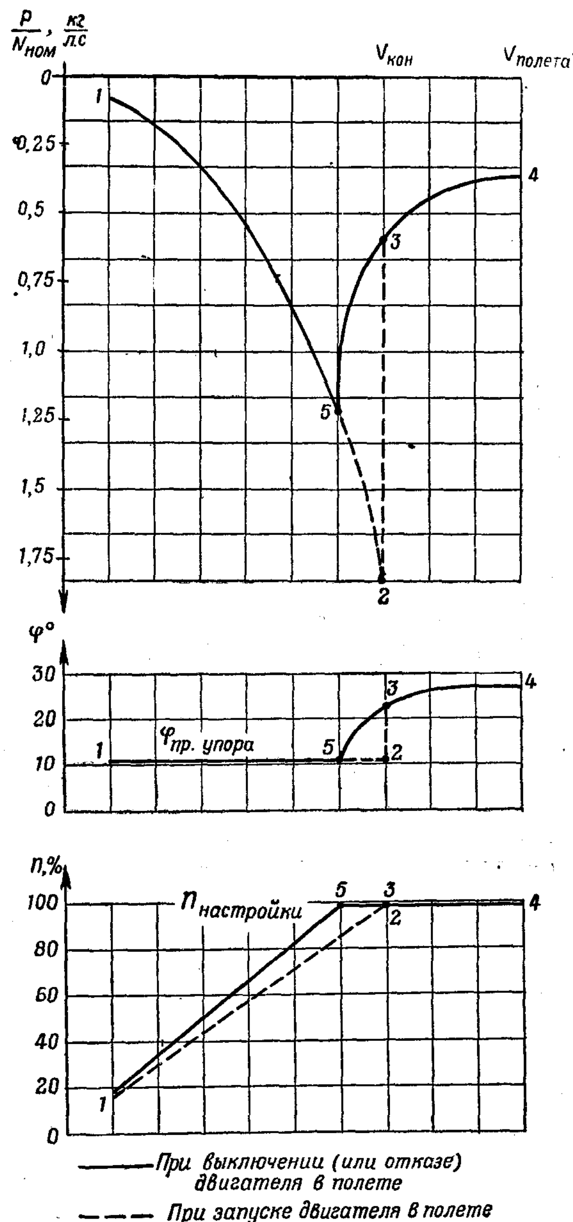


Рис. 21. Значения отрицательной тяги, угла установки лопастей винта и числа оборотов двигателя на различных скоростях полета при выключении или запуске ТВД (винт установлен на промежуточный упор $\varphi = 10°$)

вывод лопастей винта из флюгерного положения и он начинает вращаться от набегающего потока воздуха, незначительное сопротивление, которое создавала ранее не работающая силовая установка с зафлюгированным винтом, резко возрастает, переходя в отрицательную тягу. По мере уменьшения угла установки лопастей и увеличения числа оборотов авторотирующего винта величина отрицательной тяги возрастает. Наибольшего значения она достигает в последний момент перед выходом двигателя на режим (перед загрузкой винта), когда установился наименьший угол лопастей винта (достиг промежуточного упора), турбины уже начали работать, а обороты двигателя стали приближаться к оборотам настройки регулятора.

На рис. 21 показаны значения отрицательной тяги, угла установки и числа оборотов авторотирующего винта, возникающие при запуске ТВД на различных скоростях полета (точки *1*, *2*, *3*, *4*). Для сравнения показаны значения этих величин при выключении двигателя (точки *1*, *5*, *3*, *4*). В обоих случаях включен промежуточный упор $\varphi = 10°$. Из рисунка видно, что при определенной скорости полета, близкой к $V_{кон}$, величина отрицательной тяги при запуске двигателя (точка *2*) может значительно превысить значение тяги при выключении (или отказе) ТВД (точки *3* и *5*).

Величина отрицательной тяги при запуске двигателя в полете может быть снижена, если эту операцию производить на скорости, значительно меньшей скорости контроля регулятора, но, разумеется, безопасной для полета. Чем ближе скорость, на которой производится запуск двигателя, к скорости контроля регулятора, тем выше будет величина отрицательной тяги и тем труднее будет пилотирование самолета.

В случае успешного запуска двигателя отрицательная тяга большой величины действует непродолжительное время, и заранее подготовленный к борьбе с ней экипаж успешно справляется с пилотированием самолета.

Однако надо иметь в виду, что в полете двигатель может запуститься не сразу, он может «зависнуть» и не перейти на режим. Если при этом обороты не достигнут величины настроечных и регулятор не затяжелит винт, то большая отрицательная тяга будет действовать продолжительное время, создавая разворачивающий и кренящий моменты, действующие на самолет. В этом случае пилотирование самолета становится настолько затрудненным,

что единственно правильным решением будет немедленное повторное флюгирование винта. Дальнейшее продолжение полета целесообразно производить с одним неработающим двигателем и винтом, введенным во флюгерное положение. Это гарантирует достаточную безопасность полета и посадки.

---

4. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ С ТВД В ПОЛЕТЕ И НА ЗЕМЛЕ

Запуск ТВД

Основная трудность операции запуска ТВД заключается в точном выдерживании предельно допустимого значения температуры газов перед турбиной в соответствии с числом оборотов, развиваемых двигателем. При необходимой температуре двигатель быстро развивает нужное число оборотов и уверенно выходит на режим малого газа (холостого хода). Если температура газов недостаточна, двигатель обычно «зависает» (обороты не возрастают) и запуск срывается. Если температура газов превышает допустимую, создается опасность вывода из строя лопаток турбины или направляющего аппарата двигателя.

Для обеспечения оптимальных параметров запуска этот процесс регулируется специальной электрической системой по особой программе, заранее рассчитанной по времени. В такую систему входят стартер-генераторы, электрокоробка их пуска, автоматическая электропанель запуска, реле времени и другие электроагрегаты.

Эти агрегаты обеспечивают не только запуск ТВД, но и питание электроэнергией бортсети самолета после запуска. Кроме того, с помощью этих же агрегатов можно производить холодную прокрутку ТВД (или ложный запуск), при необходимости можно прекратить запуск двигателя аварийным способом, а также запускать двигатель в полете.

При запуске ТВД на земле раскрутку двигателя производят стартер-генераторы — механизмы, которые при подводе электроэнергии работают как стартеры, постепенно раскручивая вал двигателя, а после запуска и перехода ТВД на самостоятельную работу автоматически перехо-

дят на генераторный режим (при вращении вырабатывают электроэнергию). Этим достигается определенный выигрыш в весе агрегатов на ТВД, так как один и тот же агрегат выполняет последовательно две функции.

Процесс запуска ТВД можно разбить на три этапа:

1) раскрутка двигателя и воздушного винта стартер-генераторами в течение 15 *сек* до 10—14% максимального числа оборотов;

2) раскрутка двигателя и воздушного винта стартер-генераторами совместно с турбинами, которые начинают работать первоначально на пусковом, а затем (на 25—30-й *сек*) и на основном топливе;

3) разгон двигателя и выход на обороты малого газа (76—79%) за счет избыточной мощности, полученной на турбине.

Автоматика запуска ТВД обеспечивает быстрый выход двигателя на обороты малого газа (примерно за 2 *мин*). Но полностью автоматизировать запуск ТВД пока не удается из-за указанной выше трудности (поддержания температуры газов в соответствии с нарастанием оборотов двигателя), которая требует опытного оператора, управляющего запуском. Оператор имеет возможность вмешиваться в процесс подачи топлива в двигатель и при необходимости уменьшать ее, нажимая на специальную кнопку частичной «срезки» топлива.

Эта кнопка включается в случае чрезмерно быстрого увеличения температуры газов перед турбиной, чтобы предотвратить возможность выхода двигателя из строя. Раньше было сказано, что наилучшая работа ТВД достигается при предельно допустимой температуре газов. Поэтому во избежание выхода турбины двигателя из строя из-за превышения температуры выше допустимого предела инструкции по эксплуатации ТВД рекомендуют в начале запуска производить предварительную «срезку» топлива, не ожидая этого превышения температуры газов. Если «срезать» подачу топлива так, чтобы обороты двигателя все время возрастали (не допуская ни в коем случае их падения), то это и будет соответствовать наивыгоднейшему режиму запуска двигателя. Кнопка частичной «срезки» топлива опускается в тот момент, когда прекращается рост температуры газов или увеличение оборотов двигателя. В этом случае можно считать запуск удачным. В дальнейшем кнопкой «срезки» практически пользоваться не приходится.

Если запуск не удался, его можно повторить, но не раньше чем через 3 *мин*, дав охладиться стартер-генераторам.

Большое значение для успешного запуска имеет величина напряжения в сети питания стартер-генераторов. Если это напряжение не достигает, даже незначительно, необходимой величины (27,5 *в*) то двигатель будет раскручиваться стартер-генераторами слабо и не запустится.

Не менее важное значение для запуска ТВД имеет и правильная дозировка подачи топлива в процессе запуска. Если топливо подается в недостаточном количестве, двигатель не выходит на обороты малого газа (происходит так называемое «зависание» оборотов); чрезмерная же подача топлива ухудшает запуск, так как при этом резко возрастает температура газов перед турбиной и двигатель приходится выключать. Контроль за подачей топлива в процессе запуска можно осуществлять наблюдением за величиной давления основного топлива, подаваемого в камеру сгорания.

Процесс запуска ТВД осложняется еще и тем, что колебания температуры наружного воздуха в 10—15° С существенно влияют на устойчивость запуска (а подобные колебания температуры, как известно, нередки) и могут потребовать подрегулировки подачи топлива в командно-топливном агрегате в соответствии с изменением температуры.

Применение топлива с различным удельным весом также требует дополнительной регулировки.

В зимних условиях при низкой температуре наружного воздуха (—5° С) для запуска необходим повышенный расход электроэнергии. При этом, чтобы облегчить запуск, на двигателе предварительно подогреваются маслорадиатор и командно-топливный агрегат, а при температуре ниже —25° С — и двигатель.

Управление ТВД. Системы автофлюгирования (автофлюгер)

Работа ТВД в полете контролируется экипажем по величинам подачи топлива (расхода) и давления в индикаторе крутящего момента (ИКМ), а также по числу оборотов, по температуре газов и масла, по давлению топлива и другим параметрам.

Режимы работы ТВД в полете и на земле устанавливаются одним рычагом управления двигателем.

При управлении двигателем следует строго соблюдать имеющиеся ограничения, диктуемые особенностью работы ТВД

Так, например, запрещается уборка рычага управления двигателем на малые расходы топлива за проходную защелку при рулении по аэродрому или при пробе двигателя на земле, если лопасти воздушного винта установлены на промежуточный упор. Мощность турбины при этом будет недостаточна для вращения винта, двигатель перейдет в неустойчивый помпажный режим работы, при котором температура газов резко возрастет и выведет из строя турбину.

Вместе с тем даже при снятых с промежуточного упора лопастях винта не допускается уборка рычага управления двигателем за проходную защелку в промежуточное положение между режимами полетного и земного малого газа, так как на этом режиме происходит периодическое закрытие клапанов перепуска воздуха из компрессора, вызывающее неустойчивую работу ТВД. Поэтому руление самолета с ТВД рекомендуется производить на минимальном режиме работы двигателя, не разгоняя самолета и не делая резких перемещений рычагом управления двигателем.

Перед взлетом лопасти воздушного винта двигателя обязательно устанавливаются на промежуточный упор. Это делается для того, чтобы в случае отказа ТВД они не смогли уйти на минимальный угол и создать опасную отрицательную тягу. Промежуточный упор винта является как бы аварийным предохранителем. В случае прекращения взлета и уборки газа нужно снять винты с промежуточного упора, чтобы не допустить неустойчивой помпажной работы ТВД. Нередки случаи, когда экипаж забывает снять винты с упора и тем самым выводит двигатель из строя.

В конструкции ТВД предусматриваются специальные автоматы, переводящие лопасти во флюгерное положение при возможных отказах двигателя на взлетном режиме и не допускающие уменьшения установочного угла лопастей. Такие автоматы в комплексе называются *системой автофлюгирования* (или автофлюгером). До настоящего времени эти системы конструктивно выполнялись так, что срабатывали только на номинальном режиме работы ТВД и выше в случае падения мощности двигателя (давления масла в ИКМ) или падения давления топлива. На всех других режимах ввод винтов во флюгерное положение должен был осуществлять экипаж с помощью ручного управления. Это не гарантировало безопасную эксплуатацию, так как не всегда экипаж может быстро выполнить эту операцию.

В настоящее время системы автофлюгирования конструктивно доработаны таким образом, что срабатывают не только при высоких мощностях ТВД, но и на всем диапазоне рабочих режимов при появлении значительной отрицательной тяги или превышении допустимых оборотов двигателя. С помощью такой системы автофлюгирования можно обеспечить достаточную безопасность эксплуатации ТВД.

В конструктивном отношении эта система очень сложна. Вместе с тем надо сказать, что в сложной системе может быть бо́льшее количество различных неполадок, приводящих к нарушению нормальной работы ТВД в полете: к снижению подачи топлива, падению давления масла, к отказу в системе регулирования оборотов двигателя и др. Все эти неполадки приводят к появлению отрицательной тяги ТВД. Единственным надежным способом устранения отрицательной тяги в этом случае является флюгирование лопастей воздушного винта неисправного двигателя.

Отрицательная тяга, возникшая на силовой установке ТВД при полете самолета, вызывает определенные силы и моменты, действующие на самолет. Разберем их.

На рис. 22 показаны силы, действующие на самолет при исправной работе ТВД, а также при появлении отрицательной тяги на одной из силовых установок.

Когда все двигатели работают исправно в установившемся горизонтальном полете, момент от силы тяги левого ТВД уравновешивается моментом от правого. При отказе двигателя это равновесие нарушается. Появление отрицательной тяги сразу же вызывает разворот в сторону отказавшего ТВД и скольжение самолета. В результате скольжения и прекращения обдува крыла потоком от винта отказавшего двигателя быстро создается также и крен в сторону разворота. Чем выше был режим работы ТВД, тем энергичнее будет крен.

Особенно опасно появление крена в результате возникновения отрицательной тяги (при отказе двигателя) на малой скорости полета — при взлете. В горизонтальном полете будут происходить качественно те же явления, но значительно более ослабленные по своей величине.

Резкий характер проявления крена и разворота самолета с ТВД в момент отказа на взлете при надежной работе

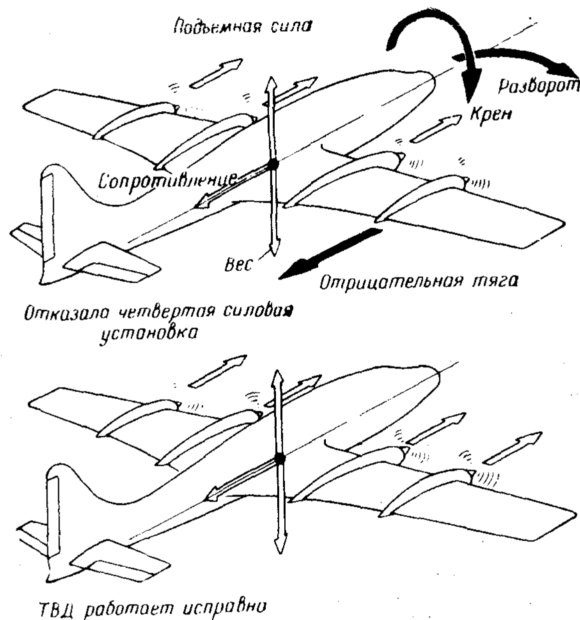


Рис. 22. Схема сил, действующих на самолет при исправной работе ТВД и отказе одного из двигателей

системы автоматического флюгирования воздушного винта совершенно не опасен.

На рис. 23 показано изменение тяги ТВД при отказе двигателя на взлете и срабатывании системы автоматического флюгирования. Из рисунка видно, что величина отрицательной тяги при этом невелика, так как автофлюгер не позволяет лопастям винта облегчиться до положения промежуточного упора, быстро затяжеляет винт и переводит лопасти во флюгерное положение.

В процессе флюгирования создается даже некоторая положительная тяга. Это происходит потому, что переходящий во флюгерное положение винт, используя кинетическую энергию вращения за счет более энергичного изменения углов установки лопастей по сравнению с потерей оборотов, непродолжительное время работает при положительных углах атаки. В дальнейшем обороты резко падают почти до нуля, а винт с лопастями во флюгерном положении создает лишь незначительное сопротивление.

Увеличив режим работы работающего двигателя и сняв нагрузки с рулей триммерами, летчик без труда может продолжать полет с одним неработающим двигателем.

Быстрота срабатывания системы автоматического флюгирования подбирается таким образом, чтобы при отказе одного ТВД на взлете, даже если летчик и не сразу вмешается в управление самолетом, крен самолета в сторону отказавшего ТВД за 5 *сек* не превысил бы 30°.

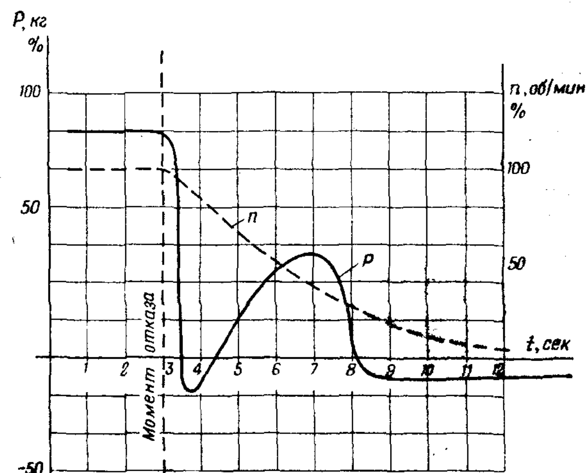


Рис. 23. Изменение тяги турбовинтового двигателя при отказе ТВД на взлете и срабатывании системы автоматического флюгирования

Практически, конечно, летчик вмешивается в управление самолетом значительно раньше и величина крена получается намного меньше.

Таким образом, система автоматического флюгирования лопастей воздушного винта ТВД надежно предохраняет силовую установку и самолет от выхода на опасный режим работы.

На самолете с четырьмя ТВД следует избегать в полете такого положения, когда два двигателя, например средние, дают положительную тягу, а два крайние — отрицательную. В практике такие явления возможны, если при планировании на посадку поставить рычаги управления крайними двигателями на проходную защелку, а средними работать для уточнения расчета на посадку. При такой работе значи-

тельно усложняется обдувка крыла и хвостового оперения самолета, что может даже привести к недостаточной эффективности работы рулей.

Действия экипажа при некоторых отказах в системе регулирования ТВД

Следует отметить, что система автофлюгирования может срабатывать не на всех режимах и не при всех возможных отказах ТВД. Возможны такие отказы в регуляторе оборотов винта, при которых эта система не может перевести винт во флюгерное положение.

В частности, система автофлюгирования не срабатывает при зависании золотника регулятора в положении облегчения лопастей винта. В этом случае будет происходить раскрутка винта. Хотя ограничитель предельных оборотов ТВД несколько снизит расход топлива и уменьшит обороты, силовая установка все же будет создавать небольшую отрицательную тягу. При указанной неисправности экипажу следует остановить двигатель и зафлюгировать винт.

Не срабатывает система автофлюгирования и при зависании золотника регулятора в положении затяжеления винта. Такое положение опасно из-за того, что при этом быстро падают обороты и, как следствие, растет температура газов перед турбиной и возникает помпажный режим работы компрессора. Если в течение 2—3 *сек* не зафлюгировать винт, то двигатель выйдет из строя.

В процессе эксплуатации ТВД могут быть также случаи нарушения герметичности каналов подачи масла в винт или отказа маслонасоса регулятора оборотов (разрушение привода насоса, качающего узла) и т. п. В конструкции винта ТВД предусматривается специальная деталь, так называемый ф и к с а т о р ш а г а — клапан, перекрывающий доступ масла к механизму винта при разгерметизации каналов маслопровода и тем самым фиксирующий лопасти винта на том установочном угле, на котором они были до отказа. При этом автоматический воздушный винт ТВД становится винтом фиксированного шага и число оборотов двигателя в дальнейшем полете будет меняться в соответствии с подачей топлива и скоростью полета. В этом случае при значительном изменении режима работы двигателя или скорости полета может возникнуть отрицательная тяга.

Как должен действовать экипаж, когда винт стал на фиксированный шаг?

В горизонтальном полете при фиксации лопастей винта можно продолжать полет, не допуская резкого изменения скорости и режима ТВД, но перед посадкой лучше такой двигатель зафлюгировать во избежание появления нежелательных явлений.

Учитывая большой запас располагаемой мощности на ТВД, следует твердо помнить, что полет с одним неработающим двигателем и зафлюгированным винтом на самолете с ТВД абсолютно безопасен.

Техническое обслуживание ТВД

В заключение остановимся на некоторых особенностях эксплуатации ТВД на земле и его технического обслуживания.

Турбовинтовой двигатель надежен в эксплуатации и не требует проведения трудоемких регламентных работ, характерных для поршневого двигателя.

В контроль за состоянием ТВД после полета, кроме обычных операций по проверке герметичности топливной и масляной систем, надежности крепления агрегатов и трубопроводов на двигателе, контровки деталей, трубопроводов и т. п., производящихся на любой силовой установке, входит также осмотр состояния лопаток турбины, компрессора и проверка времени «выбега» двигателя одновременно с прослушиванием посторонних шумов.

Последняя операция контролируется во время остановки двигателя, когда его вал продолжает вращаться по инерции. «В ы б е г о м» двигателя называется время, проходящее с момента вращения вала двигателя со скоростью 1000 *об/мин* до остановки воздушного винта. Оно не должно быть менее 60 *сек*. Уменьшенное значение «выбега» свидетельствует о повышенном трении в трансмиссии ТВД и его неисправности. Если при вращении вала ТВД в процессе «выбега» появляются посторонние шумы, вызывающие сомнения в исправности двигателя, то после остановки ТВД его вал проворачивают за лопасти винта по ходу вращения вручную и дополнительным прослушиванием убеждаются в исправности двигателя. Проворачивание вала ТВД против направления вращения не рекомендуется, так как при этом возможна поломка приводов агрегатов.

Большое значение при обслуживании ТВД имеет осмотр лопаток турбины после полета. Все ступени турбины ТВД осмотреть не удается, ввиду того что диски ступеней расположены по продольной оси двигателя одна за другой и с

тыльной стороны видно только диск последней ступени. Однако, как показала практика эксплуатации, по состоянию лопаток заднего диска также можно судить об исправности всех ступеней турбины. При оплавлении или другом разрушении лопаток передних дисков на заднем диске остаются следы в виде капель металла, которые просматриваются и прощупываются как шероховатости. Для облегчения осмотра лопаток следует применять подсвет яркой лампой-фарой.

Одновременно с проверкой состояния турбины необходимо осмотреть реактивное сопло и выхлопную трубу; при перегревах ТВД возможно их коробление и появление на них трещин.

После проведения осмотра ТВД входной и выходной каналы его закрываются специальными заглушками, предохраняющими двигатель от попадания посторонних предметов при стоянке самолета. Несмотря на эти предосторожности, после снятия заглушек перед запуском рекомендуется вторично осмотреть входной канал двигателя, так как в нем могут быть кусочки войлока от обивки заглушек.

Объем регламентных работ для ТВД незначителен, в несколько раз меньше, чем на поршневых двигателях. По сути дела все регламентные работы на ТВД сводятся к проверке состояния различных фильтров (топливных и масляных) и их промывке.

На стартер-генераторах периодически проверяется высота щеток на коллекторе. Если щетки сработались и их высота недостаточна, они заменяются новыми. Коллектор стартер-генератора систематически очищается от щеточной пыли путем продувки сжатым воздухом и протирки салфетками, смоченными в бензине.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Турбовинтовые двигатели обладают высокой мощностью и хорошей экономичностью, обеспечивая самолетам большую грузоподъемность, высокие взлетные характеристики и значительную дальность полета.

Несколько меньшая крейсерская скорость полета самолетов с ТВД по сравнению с самолетами, оборудованными ТРД, окупается бо́льшей дальностью полета и лучшими взлетными качествами.

Простота в эксплуатации и обслуживании позволяет самолетам с ТВД без задержки проводить дальние перелеты с минимальным временем стоянок для осмотров материальной части.

Благодаря указанным положительным качествам ТВД находят широкое применение на самолетах военной и гражданской авиации.

Вместе с тем, прочитав эту брошюру, читатель убедился, что ТВД способен на некоторых режимах полета и при отказе двигателя создавать отрицательную тягу. Это качество ТВД требует от всего летного и технического состава, эксплуатирующего самолеты с этими двигателями, предельной внимательности в полете и отличного знания всех особенностей возникновения отрицательной тяги, чтобы в нужный момент правильными действиями обеспечить безопасность полета.

Многочисленные автоматические системы флюгирования лопастей воздушных винтов, срабатывающих при появлении отрицательной тяги, могут отказать в работе, и тогда от летного экипажа потребуется все умение и выдержка,

чтобы правильными, грамотными действиями добиться восстановления нормального полета. Если читатель, прочтя эту работу, почерпнет в ней знания, нужные ему для практической работы, автор будет считать свою задачу выполненной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулагин И. И. Теория газотурбинных реактивных двигателей. Оборонгиз, 1952 г.
2. Иноземцев И. В., Зуев В. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Оборонгиз, 1949 г.
3. Сидоров И. А., Теуш В. Л. Общий курс воздушных винтов. Оборонгиз, 1943 г.
4. Теуш В. Л. Работа воздушного винта. Оборонгиз, 1944 г.
5. Чернокозов В. А., Паньшин А. И. Отрицательная тяга воздушного винта. Журн. ВВФ, 1960 г., № 9.
6. Филиппов В. В. Как летчику бороться с отрицательной тягой ТВД? Журн. ВВФ, 1959 г., № 1.
7. Безопасность работы воздушного винта на самолетах с турбовинтовыми двигателями. Перев. журн. Флайт 25.4.1958 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Введение 3

1. Краткая характеристика турбовинтовых двигателей и их агрегатов 5

Одновальные и двухвальные ТВД . . . . —

Тяга и мощность ТВД 10

Регулирование ТВД 14

2. Особенности работы и управления силовой установки с ТВД 19

Безопасные режимы работы ТВД . . . . —

Работа ТВД по дроссельной характеристике 24

Работа ТВД по высотной характеристике 25

3. Отрицательная тяга силовой установки с ТВД и способы ее ограничения 28

Условия образования отрицательной тяги . . . . —

Промежуточный упор лопастей 32

Зависимость отрицательной тяги от расхода топлива и скорости полета 34

Влияние температуры наружного воздуха на образование отрицательной тяги 41

Полет с авторотирующим винтом. Вывод винта из флюгерного положения 42

4. Особенности эксплуатации силовой установки с ТВД в полете и на земле 47

Запуск ТВД . . . . —

Управление ТВД. Системы автофлюгирования (автофлюгер) 49

Действия экипажа при некоторых отказах в системе регулирования ТВД 54

Техническое обслуживание ТВД 55

Заключение 57

Литература 59

ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ФИЛИППОВ

Как летчику бороться с отрицательной тягой ТВД

М., Воениздат, 1961. 64 с.

Редактор инженер-подполковник *Дружининский М. В.*

Технический редактор *Срибнис Н. В.* Корректор *Шурупова Л. И.*

Сдано в набор 19.11.60 г. Г-70477. Подписано к печати 28.3.61 г.

Формат бумаги 84×108 1/32 — 2 печ. л. = 3,28 усл. печ. л. 2,819 уч.-изд. л. Тираж 6 000

Изд. № 6/2793. Зак. 712

1-я типография

Военного издательства Министерства обороны Союза ССР

Москва, К-6, проезд Скворцова-Степанова, дом 3

Цена 10 коп.